

**Technická univerzita v Liberci**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetických zařízení**



**Diplomová práce**

2008

Vít Hubáček



**TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



---

**Katedra energetických zařízení**

Studijní program: magisterský – M2301 strojní inženýrství

Obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Tepelná technika

**Vít Hubáček**

**Tepelná bilance procesu výroby PVC kůže**

**(Thermal balance of PVC skin manufacturing)**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Antonín Potěšil, Csc.

Rozsah práce

Počet stran: 67

Počet obrázků: 23

Počet tabulek: 32

Počet grafů: 23

Počet příloh: 2

Liberec 2008

## **TÉMA:** Tepelná bilance procesu výroby PVC kůže

### **ANOTACE:**

Tato diplomová práce obsahuje souhrn současných poznatků o procesu výroby PVC kůže technologií slush molding, podává přehled o tepelných parametrech procesu a základních možnostech průmyslově používaných způsobů ohřevu formy. V této diplomové práci je též obsažen popis a výsledky experimentů pro určení tepelné bilance při výrobním procesu a ověření možnosti použití numerické simulace pro modelování průběhu procesu.

## **THEME:** Thermal balance of PVC skin manufacturing

### **ANNOTATION:**

This diploma thesis includes summary of the present knowledge about PVC skin manufacturing via slush molding technology. Presented thesis provides overview of thermal parameters of slush molding process and leading industrial methods used for heating of the mold. Description and results of the experiments and experimental setup prepared to determine the thermal balance of molding technology are presented. Results of the numerical simulation of slush molding process are also shown in this diploma thesis.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Slush molding, PVC kůže, tepelná bilance

**KEY WORDS:** Slush molding, PVC skin, thermal balance

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřeby TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 23. května 2008

Podpis: .....

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my theses to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec 23th May 2008

Signature: .....

**Poděkování:**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Tomáši Vítovi, PhD., za odborné vedení, cenné rady, připomínky, čas a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat firmě Lenam s.r.o. za poskytnutou možnost tvorby diplomové práce, panu Petrovi Jerje za pomoc a čas při práci v laboratoři a v neposlední řadě také svým rodičům, přítelkyni a přátelům za podporu, kterou mi věnovali.

# Obsah:

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	9 -
Úvod do problematiky .....	10 -
<b>1. Slush molding technologie .....</b>	<b>12 -</b>
1.1 Podstata .....	12 -
1.2 Popis .....	12 -
1.3 Fáze procesu .....	13 -
1.4 Základní parametry procesu .....	15 -
1.5 Materiály .....	15 -
1.5.1 Polyvinylchlorid ( PVC ) .....	15 -
1.5.1.1 PVC pro slush molding .....	15 -
1.5.1.2 Výroba PVC .....	16 -
1.5.2 Termoplastický polyuretan .....	17 -
1.5.3 Termoplastický polyolefin ( TPO ) .....	17 -
1.5.4 Ethylen propylen .....	17 -
1.6 Způsoby ohřevu formy .....	18 -
1.6.1 Ohřev zářiči infračerveného světla .....	18 -
1.6.2 Ohřev vzduchem .....	19 -
1.6.2.1 Princip a možnosti provedení .....	19 -
1.6.2.1 Zvýšení součinitele přestupu tepla mezi formou a horkým vzduchem .....	20 -
1.6.3 Ohřev kapalinou .....	22 -
<b>2. Parametry prášku a výsledné kůže .....</b>	<b>24 -</b>
2.1 Parametry prášku .....	24 -
2.1.1 Parametry prášku udávané výrobcem .....	24 -
2.1.2 Naměřené parametry prášku .....	24 -
2.2 Procesní informace .....	26 -
2.3 Parametry kůže .....	26 -
2.3.1 Parametry kůže udávané výrobcem .....	26 -
2.3.2 Naměřené parametry kůže .....	26 -
<b>3. Analytické řešení tepelné bilance procesu slush molding .....</b>	<b>27 -</b>
3.1 Nestacionární vedení tepla .....	27 -
3.2 Aplikace nestacionárního vedení tepla na proces slush molding .....	29 -
3.2.1 Odvození vztahů pro vedení tepla poloneomezeným prostředím .....	29 -
3.2.2 Výsledky analytického řešení .....	33 -

<b>4. Numerická simulace tepelné bilance procesu slush molding</b>	- 37 -
4.1 Model pro numerickou simulaci	- 37 -
4.2 Nastavení parametrů numerické simulace	- 38 -
4.2.1 Materiálové vlastnosti	- 38 -
4.2.1.1 Hliník	- 38 -
4.2.1.2 PVC	- 38 -
4.2.2 Počáteční podmínky	- 40 -
4.2.2.1 Počáteční teplota formy	- 40 -
4.2.2.2 Počáteční teplota prášku	- 40 -
4.2.3 Okrajové podmínky	- 40 -
4.2.3.1 Tepelný tok formy	- 40 -
4.2.3.2 Fixace formy	- 41 -
4.2.3.3 Fixace PVC	- 41 -
4.2.4 Nastavení úlohy	- 42 -
4.2.5 Nastavení řešiče	- 42 -
4.3 Výsledky numerické simulace	- 43 -
<b>5. Experimentální určení tepelné bilance při procesu slushování</b>	- 46 -
5.1 Mini – slush modul	- 46 -
5.2 Cíle experimentů	- 48 -
5.3 Průběh experimentů	- 48 -
5.4 Výsledky experimentů	- 50 -
5.4.1 Tabulky naměřených hodnot	- 51 -
5.4.2 Tepelná bilance kůže	- 55 -
<b>6. Porovnání výsledků numerického a analytického řešení s experimenty</b>	- 60 -
6.1 Porovnání teplotních spádů	- 60 -
6.2 Kritická teplota	- 61 -
<b>Závěr</b>	- 64 -
<b>Použitá literatura a zdroje informací</b>	- 66 -

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
$a$	součinitel teplotní vodivosti	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$c_p$	tepelná kapacita	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$c_{pp}$	tepelná kapacita prášku	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$c_{pu}$	upravená tepelná kapacita	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$I$	napájecí proud	A
$L$	délka	m
$m_k$	hmotnost kůže	kg
$P$	výkon dodávaný formě	W
$P_{1\text{mm}}$	výkon potřebný na výrobu kůže o tloušťce 1mm	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$
$P_{1\text{kg}}$	výkon potřebný na výrobu kůže o hmotnosti 1kg	$\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$
$q_x$	hustota tepelného toku	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$Q$	celkové množství tepla převedeného do prostředí/kůže	J
$Q_{1\text{m}^2}$	množství tepla potřebného k vyrobení kůže o ploše $1\text{m}^2$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$
$Q_{1\text{mm}}$	množství tepla potřebného k vyrobení kůže o tloušťce 1mm	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$
$S$	plocha	$\text{m}^2$
$t$	čas	s
$t_1$	doba aplikace prášku	s
$t_2$	doba želírování	s
$T$	teplota	$^{\circ}\text{C}$
$T_f$	teplota okolí	$^{\circ}\text{C}$
$T_s$	teplota stěny/formy	$^{\circ}\text{C}$
$T_0$	počáteční teplota prášku	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{krit}}$	kritická teplota	$^{\circ}\text{C}$
$x$	kolmá vzdálenost od roviny stěny/formy	m
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\delta$	tloušťka kůže	m
$\lambda$	tepelná vodivost	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\rho$	měrná hmotnost	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$



# Úvod do problematiky

Slush molding je technologie výroby spékáním polymerového prášku na povrchu vyhráté formy, za vzniku homogenní, tenké, pružné vrstvy, která je používána jako imitace kůže v automobilovém a lodním průmyslu. Tato technologie dovoluje vyrábět kůže prostorově a designově velice složitého tvaru tak, aby je bylo možno aplikovat jako potahovou vrstvu na prvky automobilových nebo lodních interiérů, jako jsou např. palubní desky, vnitřní boky dveří apod..

Jedná se o poměrně mladou technologii, která však zažívá veliký rozmach díky jednoduchému principu výroby výsledného produktu. Tato relativní jednoduchost celého procesu však v praxi naráží na četné problémy.

Hlavní úskalí spočívá v nedostatku znalostí o parametrech výroby. Nejsou známy přesné fyzikální vlastnosti a chování prášku v celém průběhu procesu, což výrazně snižuje možnost předběžných výpočtů a numerických simulací, které by umožnily výrobu optimalizovat.

Další překážkou je praktická nemožnost dodržení parametrů výroby předepsaných výrobcem prášku. Především se jedná o dodržení rovnoměrného rozložení teploty formy, s ohledem na její velkou tvarovou složitost, požadavek na různou tloušťku kůže, například v místech pro airbag v palubní desce a v neposlední řadě na ekonomickou přijatelnost konstrukčního řešení výrobního zařízení a energetickou náročnost procesu. Předepsaná teplota formy by se měla pohybovat v rozmezí  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , v praxi však není výjimkou rozmezí  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . To má za následek vysokou zmetkovitost v počátku výroby způsobenou především nedokonalé spečením práškem v celé ploše kůže nebo naopak vznikem spálených míst kůže, které se projevují změnou vlastností materiálu a odstínu barvy povrchu.

Počáteční nastavení parametrů výroby se v praxi provádí dle doporučení výrobce prášku a zkušenosti. V průběhu výroby je pak proces optimalizován na základě kvality výsledné kůže. To je ale vzhledem k dynamicky se měnícímu trhu, časté obměně modelů nebo jen prvků automobilů, které je spojeno s nutností výměny formy a přenastavením celého zařízení, ekonomicky nevýhodné.

Cílem této diplomové práce je předložit souhrn základních informací o podstatě, technologických možnostech a současném stavu této technologie, objasnit některé zákonitosti výroby, především tepelnou bilanci procesu a závislost tloušťky kůže na teplotě formy a době

aplikace prášku, pokusit se lépe popsat průběh spékání prášku a ověřit možnost jeho numerické simulace, případně analytického výpočtu.

# 1. Slush molding technologie

## 1.1 Podstata:

Slush molding je proces, při kterém je suchý polymerový prášek (plastisol) zaveden do vyhřívané formy, kde se vlivem působící teploty změní v tuhý gel – „kůži“. Tloušťka gelové vrstvy je závislá na teplotě povrchu formy a době setrvání prášku ve formě. Poté je přebytečný prášek vysypán, forma zchlazena a gelová vrstva vyjmuta z formy.

Výsledný produkt je používán v automobilovém a lodním průmyslu jako imitace kůže v interiérech vozidel a plavidel.

## 1.2 Popis:

Slush molding je unikátní technologická operace původně vyvinuta pro materiály založené na bázi polyvinylchloridu. Je využívána k produkci rozličných částí automobilového a lodního interiéru, především potahů palubních desek, kde je potřeba dosáhnout relativně složité tvarové členitosti. Tato technologie umožňuje výrobu třírozměrných imitací kůže, např. i vícebarevných, s vysokou kvalitou, nenáročným způsobem a s nízkými náklady.

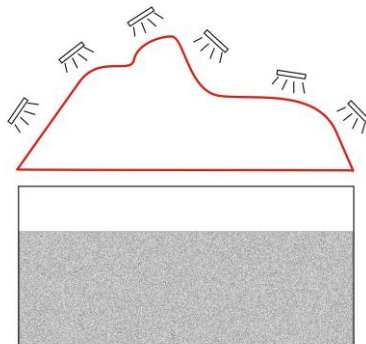


*obr.1.2.1 - Detail palubní desky potažené imitací kůže vyrobené technologií slush molding [2]*

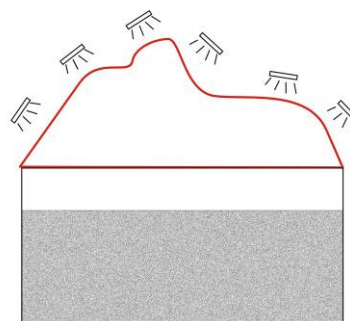
## 1.3 Fáze procesu

Slush molding technologie typicky zahrnuje následující fáze:

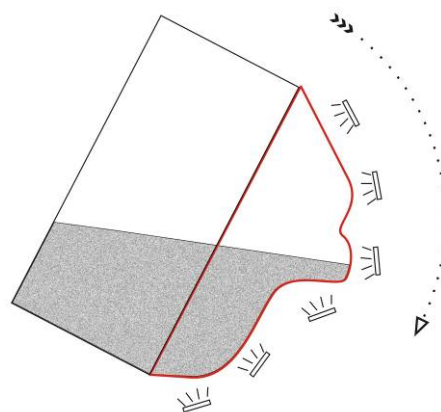
- a) otevřená nádrž je nejprve naplněna vhodným práškovým polymerem v dostatečném množství a s velikostí zrna obvykle pod 500 mikrometrů
- b) forma, obvykle poniklována, je předem vyhřáta na požadovanou teplotu



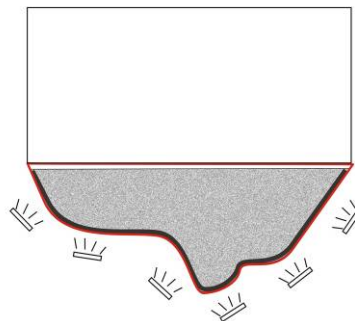
- c) nádrž a forma jsou spojeny v uzavřený systém vhodnou vazbou



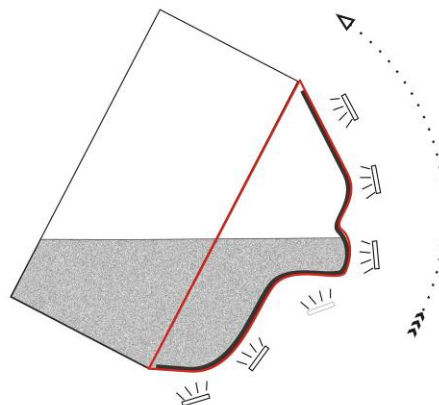
- d) systém vykoná takový pohyb, aby byl prášek rovnoměrně rozprostřen do formy.



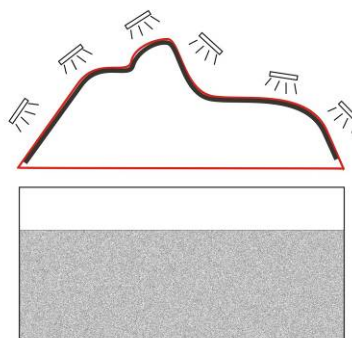
- e) část prášku je roztavena v homogenní vrstvě, která přilne k formě (tloušťka gelové vrstvy se obvykle vyrábí dle potřeby od 0,1 do 2 mm)



- f) systém je poté navrácen do výchozí pozice, v této fázi je případný přebytek polymerového prášku přemístěn zpět do nádrže a může tak být použit znovu, systém se otevře



- g) následuje fáze želírování, tj. prohřátí prášku za účelem homogenizace struktury vznikající kůže a dokončení případných chemických reakcí. Forma může být nyní ještě vyhřívána a je možno s ní vhodně pohybovat či rotovat s ohledem na dokončení želírovacího procesu a zrovnoměnění tloušťky kůže.



- h) forma je poté zchlazena
- i) kůže je svlečena z formy jako polotovar, který je poté upraven na konečný tvar (ořez hran apod.)



## 1.4 Základní parametry procesu

Teploty a časy potřebné k vytvoření homogenní gelové vrstvy se liší dle použité materiálové směsi a potřebné tloušťky výsledné vrstvy.

Forma bývá vyhřáta podle použitého prášku na teplotu 180 – 270 °C, nejvíce preferovány jsou teploty 200 – 250 °C. Teplotní cyklus (čas, po který je forma vyhřívána na požadovanou teplotu pro vytvoření homogenní vrstvy kůže) se pohybuje od jednotek vteřin až do jednotek minut. Za těchto podmínek je prášková kompozice roztavena a u některých směsí případně zesíťována (cross-linked). Teploty a časy potřebné k zesíťování se liší dle použitého kopolymeru (cross-linking kopolymer). Teploty zesíťování se obvykle pohybují od 60 do 150 °C, nejvíce preferované jsou teploty 90 – 120 °C. Časy zesíťování se pohybují od 10 sekund do jedné hodiny, nejčastěji od jedné minuty do 30 minut.

## 1.5 Materiály

### 1.5.1 Polyvinylchlorid (PVC)

#### 1.5.1.1 PVC pro slush molding

V oblasti materiálů má své pevné místo polyvinylchlorid (PVC), který má výborné vlastnosti pro průběh slushování. Má vysokou molekulární hmotnost, jež zajišťuje výsledným produktům dobré mechanické vlastnosti a teplotní odolnost a zároveň po roztavení nízkou

viskozitu umožňující rovnoměrné rozprostření ve formě. PVC je však kritizován kvůli obsahu halogenů a změkčovadel. Změkčovadla obsažená v PVC usnadňují tečení a tavení prášku v kontaktu s horkou formou. Jednou z aplikací PVC v interiérech automobilů, jsou technologie slush molding vyrobené potahy palubních desek, kde přítomnost vysokého množství změkčovadel, způsobuje negativní efekt mlžení vnitřního povrchu čelního skla během horkých letních dnů. Dalším nedostatkem PVC je ztráta pružnosti a křehkost vlivem vyprchávání změkčovadel postupem času. Efekt mlžení skel a ztráta pružnosti materiálu stejně jako vysoký obsah chloru v PVC byl impulsem pro hledání polymerových změkčovadel nebo vysoce teplotně stálých změkčovadel a materiálů bez obsahu halogenů.

Polyvinylchlorid je uhlovodíkový polymer, jehož základními stavebními bloky jsou chlor, uhlík a vodík. Tyto základní elementy se získávají z mořské vody (chlorid sodný, NaCl) a surové nafty nebo zemního plynu, což jsou směsi uhlovodíků.

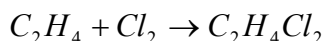
PVC je termoplast, to znamená, že měkne se zvyšující se teplotou a naopak se snižující se teplotou tvrdne.

PVC začal být poprvé masivně používán za druhé světové války jako izolační materiál elektrického vedení místo gumové pryže, které byl nedostatek. Od té doby se našlo rozličné množství jiných aplikací a v dnešní době je PVC druhý nejpoužívanější plast na světě.

### 1.5.1.2 Výroba PVC

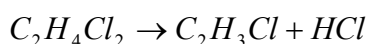
#### 1. krok – výroba ethylen dichloridu

Chlorid je extrahován elektrolýzou z mořské vody a ethylen je odvozený z uhlovodíku výše zmíněných surovin. Jejich reakcí je produkován ethylen dichlorid (1,2-dichlorethan) dle následující rovnice:

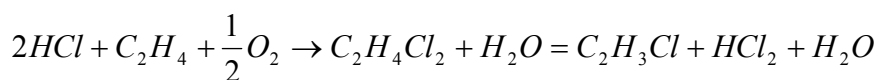


#### 2. krok – výroba monomeru vinyl chloridu

Ethylen dichlorid je rozložen za působení vysokých teplot dle rovnice:

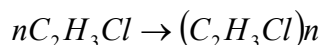


Chlorovodík (HCl) dále reaguje s dalším ethylenem za přítomnosti kyslíku a produkuje ethylen dichlorid. Ethylen dichlorid takto vyprodukovaný je opět rozložen dle předchozí rovnice a chlorovodík opět reaguje.



3. krok – výroba polyvinylchloridu

Reakcí dochází k otevření dvojných vazeb v monomeru vinylchloridu (VCM) dovolující sousedním molekulám, aby se spojily v dlouhé řetězce molekul.



## 1.5.2 Termoplastický polyuretan

Nejpoužívanější bez-halogenové systémy jsou založeny na použití termoplastického polyuretanu (TPU). TPU vykazuje lepší vlastnosti při nízkých teplotách a neztrácí ohebnost vlivem stárnutí jako PVC. Bohužel kvůli jejich vysoké ceně nejsou ekonomickým řešením pro běžné použití.

## 1.5.3 Termoplastický polyolefin (TPO)

Další možností je termoplastický polyolefin (TPO), který je díky zájmu o alternativy k PVC reálnou možností. TPO nabízí lepší ohebnost než PVC a díky absenci nízkomolekulárních změkčovadel i vyšší trvanlivost. Výhody TPO oproti PVC představují i vyšší měrná hmotnost prášku a recyklovatelnost. Vzhledem k semi-krystalické podstatě TPO kompozice (jedná se o směs polypropylenu a polyolefinické pryže) je však jeho zpracování slushováním, oproti PVC, výrazně složitější. Další kritická vlastnost pro kvalitní slush molding a dosažení dobré kvality povrchu je sypání (tečení) prášku formou, na které má vliv kvalita zrna. TPO vyžaduje kryogenní (pod bodem mrazu) mletí prášku. Mletí vytváří háčky a řasy na částicích prášku, což má zhoršující vliv na sypání a tím pádem i kvalitu povrchu výsledného produktu. Zároveň se velice prodražuje proces výroby.

## 1.5.4 Ethylen propylen

Alternativu nabízejí systémy založené na elastomerovém prášku polypropylenu (PP) a pro slush molding použitelném ethylen propylen (EP) s příčnou vazbou mezi fázemi. Nevýhoda těchto systémů spočívá v nízké odolnosti vůči chemickým činitelům, jako např.



kapalinám a proto je nutné je opatřit nákladnou povrchovou úpravou. Pomocí kombinace slush molding metody a vytváření příčných vazeb polyolefinové kompozice je však možné docílit vynikající chemické a teplotní odolnosti materiálu.

## **1.6 Způsoby ohřevu formy**

Technologie slush molding je založena na přeměně sypkého prášku v tuhou kůži roztavením ve formě vyhřáté na nejčastěji 200 – 250 °C a následným ochlazením. Způsobů a médií jak formu na tyto teploty nahřát, se v technické praxi používá několik. Každý způsob má své výhody a nevýhody, které je nutné zohlednit při návrhu formy a přizpůsobit pro dosažení požadovaného produktu. Hlavním kritériem je dosažení pokud možno rovnoměrné teploty po celém vnitřním povrchu formy, které vyplývá z požadavku na homogenní strukturu a konstantní tloušťku kůže. Vzhledem k tomu, že je teplo do formy přiváděno přes vnější povrch a vzhledem k rozmanitosti tvaru některých produktů, např. potahů palubních desek automobilů s odkládacími prostory na drobnosti, nápoje, apod. je často dosažení rovnoměrného ohřevu velice složité.

### **1.6.1 Ohřev zářiči infračerveného světla**

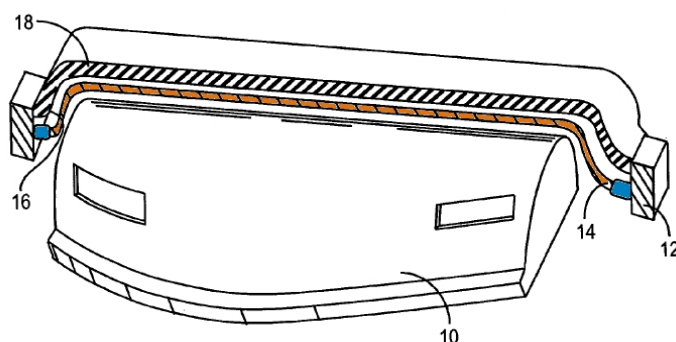
Jednou z možností je ohřev pomocí zářičů infračerveného světla.

Zářič infračerveného světla (IR světla) je těleso s vysokou teplotou, ze kterého je teplo transportováno do tělesa o nižší teplotě pomocí elektromagnetického záření. V závislosti na teplotě emitujícího tělesa se vlnová délka IR světla pohybuje v rozmezí 780 nm až 1 mm. Hrubá klasifikace IR zářičů je spojena se skupinami vlnových délek s významnější emisí energie. Krátkovlnné nebo též blízké infračervené zářiče (NIR = near infrared) pro rozmezí 780 nm až 1400 nm, jsou též nazývány bright (zářivé), jelikož vyzařují část světla ve viditelném spektru. Střední IR pro rozmezí 1400 nm až 30 μm a vzdálené IR nebo též dark (temné) zářiče pro vlnové délky nad 30 μm.

Velkou výhodou IR zářičů je rychlý náběh na maximální výkon a nízká tepelná setrvačnost. Díky tomu je možné proces ohřevu rychle korigovat vypínáním/zapínáním jednotlivých zářičů, případně změnou jejich výkonu a zároveň použít tenčí formu než v případě ohřevu horkým vzduchem, jelikož není tak vysoký požadavek na tepelnou kapacitu

formy. S použitím tenčí formy je spojena výhoda jejího rychlejšího ochlazení a tím urychlení celého procesu.

Jak popisuje např. patent US20040113322 (Plastic skin forming proces) lze použít zářiče, které kopírují povrch formy (*obr.1.6.1 č.14*) a tím zajistit rovnoměrnější ohřev.



*Obr. 1.6.1: náčrtek formy vyhřívané IR zářiči (10-niklová forma; 12-vnější rám; 14-zářiče; 16-reflexní vrstva; 18-izolace) [3]*

Aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti přenosu tepla mezi zářiči a formou je nutno opatřit formu vhodným nátěrem tak, aby měla co nejvyšší absorpci IR záření ve stejném spektru vlnových délek jako emituje zářič. S velkou výhodou je možno využít rozdílné absorpce záření nátěrů různých odstínů šedé barvy. Místa opatřena černým nátěrem absorbují více záření, resp. tepla a šedá místa naopak méně. Tím lze dosáhnout rozdílné tloušťky výsledné kůže v definovaných místech a zajistit tak úsporu materiálu a času potřebného k následnému opracování kůže.

Nevýhodou ohřevu IR zářiči může být světelná podstata přenosu tepla (přímocharé šíření elektromagnetických vln), což může zapříčinit problémy při ohřevu tvarově složitých prvků, jako jsou různé výdutě, štěrby nebo přímo neosvětlené hrany.

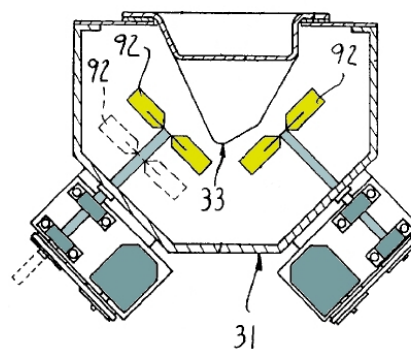
## **1.6.2 Ohřev vzduchem**

Další průmyslově využívanou metodou je ohřev horkým vzduchem.

### **1.6.2.1 Princip a možnosti provedení**

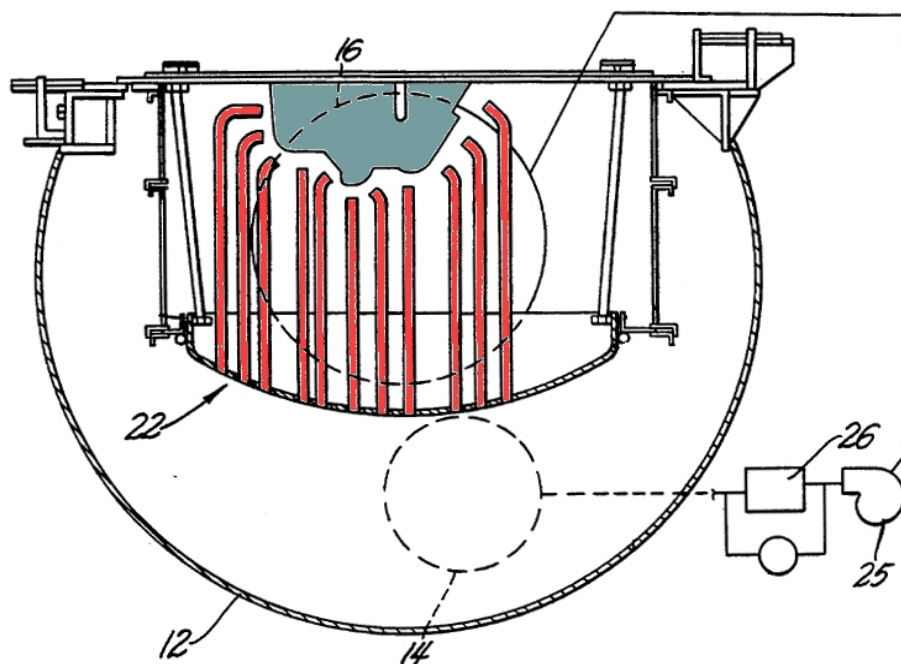
Vzduch je ohříván elektrickou topnou spirálou nebo ve výměníku jiným médiem na požadovanou teplotu. Požadavek na proud vzduchu je jeho vysoká rychlost a turbulizace, které zajistí intenzivnější přestup tepla do materiálu formy a zajistí přenos tepla i ve tvarově členitých místech. Proto je proud vzduchu pomocí ventilátoru a vhodné trysky směřován k povrchu formy.

Jiná možnost je, jak popisuje patent US6019590 (Slush molding apparatus), obtékání vzduchu kolem formy uzavřeným kanálem, kde jsou z důvodu intenzivnějšího přestupu tepla instalována proti povrchu formy axiální dmychadla (obr.1.6.2 č.92), která destabilizují mezní vrstvu a směřují proud vzduchu do méně přístupných míst.



Obr. 1.6.2: náčrtek formy ohříváné vzduchem (31-dutá vnější forma; 33- skořepinová forma; 92-axiální ventilátory) [3]

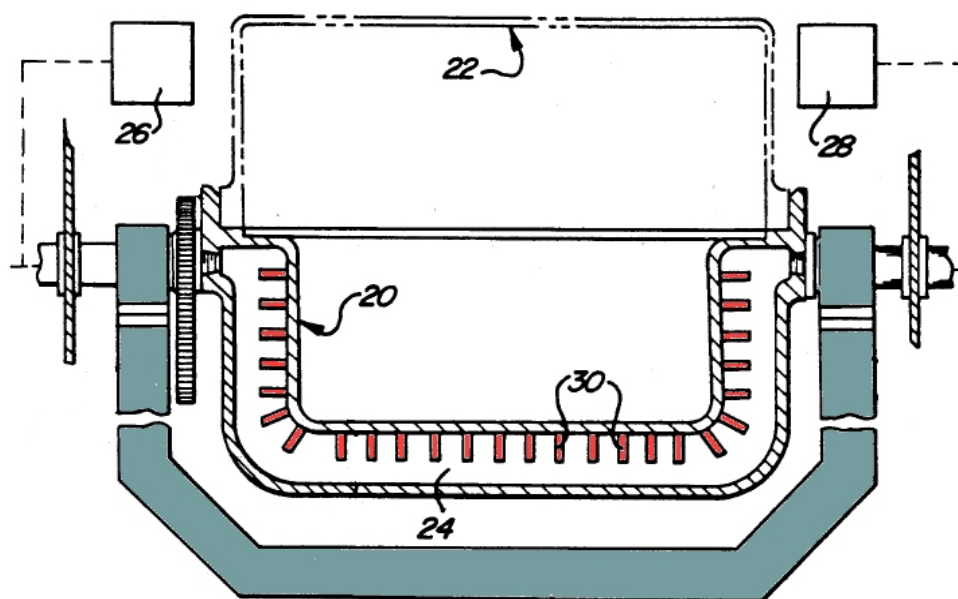
S jiným řešením optimalizace toku média přichází patent US5445510 (Mold heating apparatus). Vnější rám formy je rozdělen na dvě komory spojené trubicemi (obr.1.6.7). Medium je čerpáno ze spodní komory do horní a pomocí trubic usměrňováno k povrchu formy. Trubice jsou snadno vyměnitelné za jiné tak by bylo možno využít aparát pro více forem při zachování ideálního nasměrování proudu média pro každou z nich.



Obr. 1.6.7: náčrtek formy s optimalizací toku média (12-plénium; 14-vstup média; 16-výstup média; 22-trubice; 25-čerpadlo; 26-ohřívák) [3]

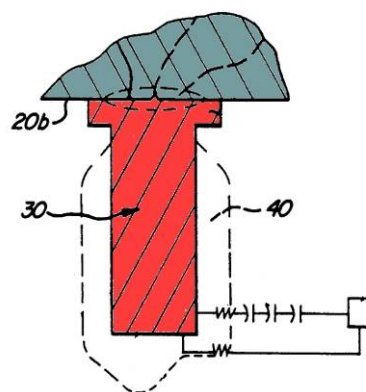
### 1.6.2.1 Zvýšení součinitele přestupu tepla mezi formou a horkým vzduchem

Vzhledem k nízkému součiniteli přestupu tepla mezi vzduchem a formou je proces nahřívání a případné korekce teploty časově náročný. Ke zintenzivnění přenosu tepla je možné formu opatřit kovovými žebry nebo kolíky (*obr.1.6.3 č.30*), čímž se zvětší specifická plocha umožňující výměnu tepla. Jakákoli úprava formy pájením, navařováním nebo už i samotná její výroba je však velice složitá, jelikož se jedná o relativně tenkou skořepinu, která je velice náchylná na manipulaci a teplotní namáhání. Je potřeba zajistit aby se forma vlivem mechanického namáhání nebo teplotních změn nedeformovala, případně nedošlo k porušení zrna materiálu formy. Další problém skýtá nebezpečí snížení životnosti formy, popřípadě jejího porušení, vlivem vysokých gradientů tepla v místě spoje žebra s tenkou formou při ohřevu nebo intenzivním chlazení, které se provádí obvykle rozprášením a odpařením vody nebo jiného média přímo z povrchu formy.



*Obr. 1.6.3: náčrtek formy opatřené kolíky pro zvýšení specifické plochy (20-skořepinová forma; 22-nádrž na prášek; 24-meziprostor vyhřívacího nebo chladičího vzduchu; 26-ohřívací zařízení; 28- chladičí zařízení; 30-kolíky zlepšující přenos tepla) [3]*

Touto problematikou se zabývá např. patent US5032076 (Metal mold with extended heat transfer surface ), který popisuje způsob navařování kolíků, kdy je svar vytvořen odporovým svářením za průchodu velkého proudu mezi formou a kolíkem po velice krátkou dobu (méně než 1 s) (obr.1.6.4). Jako zdroj proudu slouží vybíjejí se kapacitor. Právě díky intenzivnímu proudu za krátký časový úsek dojde k navaření kolíku bez většího ovlivnění struktury okolního materiálu.



Obr. 1.6.4: navařování kolíku (20b- vnější povrch formy; 30-kovový kolík; 40-pistole pro navařování vybíjením kapacitoru ) [3]

Namísto ohřevu vzduchu se v některých provozech používá ohřev formy spalováním vhodného plynu, kdy je forma vyhřívána přímo plamenem z hořáků.

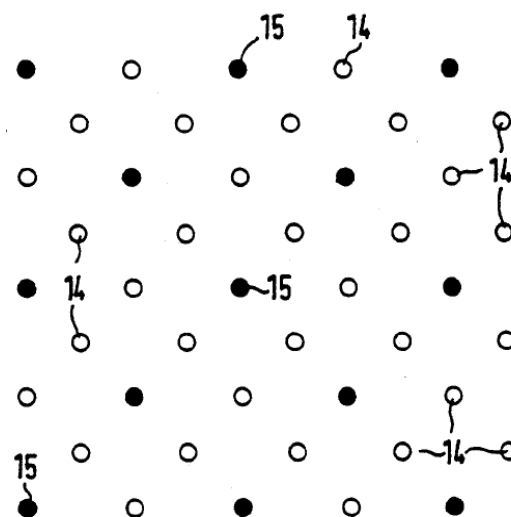
### 1.6.3 Ohřev kapalinou

Jiným neméně zajímavým médiem pro ohřev formy jsou kapaliny, převážně syntetické oleje. Nespornými výhodami kapalinového systému jsou velká tepelná kapacita média a vysoký součinitel přestupu tepla mezi formou a kapalinou. Díky tomu je medium schopno akumulovat velké množství tepla a následně ho intenzivně předat formě, potažmo prášku, při slushování. Na druhou stranu jsou jako s každým kapalinovým systémem spojeny problémy s těsností.

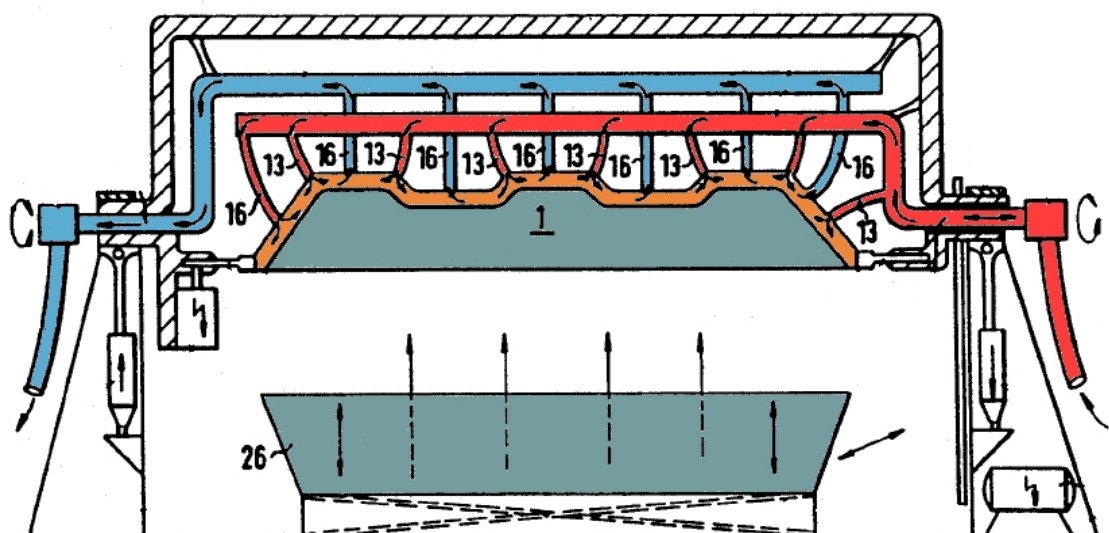
Konkrétních řešení systému ohřevu může být celá řada. Nejjednodušším z nich je olejová lázeň. Forma je ponořena do olejové lázně, kde se prohřeje na požadovanou teplotu, poté je do ní vysypán plnicí tryskou prášek. Forma je vyjmuta, přebytečný prášek je vysypán a forma je vložena do chladicí lázně. Po ochlazení se vyjme výsledný produkt a cyklus se opakuje. Tento princip se používá především pro výrobu menších dílů.

Jiným řešením je ohřev kapalinou proudící esovitě stočenými trubkami, vinutými po povrchu formy.

Další variantu předkládá patent US5445510 (Apparatus for the production of molded skins and bodies of plastic material). Ohřáté médium je přiváděno soustavou trysek do šterbinového prostoru dvouplášťové formy (obr.1.6.6). Soustava trysek je řešena jako jakési síto, kde některá oka slouží pro přívod a jiná pro odvod oleje (obr.1.6.5). Uspořádání vstupních a výstupních trysek může být asymetrické pro lepší kompenzaci případné rozdílné tloušťky formy, nebo vzhledem k požadavku různé tloušťky výsledné kůže v daných místech.



Obr. 1.6.5: náčrtek uspořádání trysek vzduchu (14-přívod horkého média; 15-odvod ochlazeného média) [3]



Obr. 1.6.6: náčrtek kapalinou ohříváné formy (1-forma; 13-trysky horkého média; 16-odtah ochlazeného média; 26-nádrž na prášek) [3]

## 2. Parametry prášku a výsledné kůže

Pro experimentální výrobu kůže, analytické řešení i numerickou simulaci byl použit prášek NAKAN DSY 260/02 barvy Achatgrau.

### 2.1 Parametry prášku

#### 2.1.1 Parametry prášku udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Metoda měření
Měrná hmotnost	0,64	g/cm <sup>3</sup>	ISO 60
Tekutost ( flowability )	45	s	ISO 6186
Velikost částic < 400 μm	< 0,5	%	DIN 53 734
Doba želírování při 240°C	20	s	ATO MCR 051
Tepelná stabilita při 220°C	50	min	ISO 182-1
Tepelná vodivost	0,1	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	

#### 2.1.2 Naměřené parametry prášku

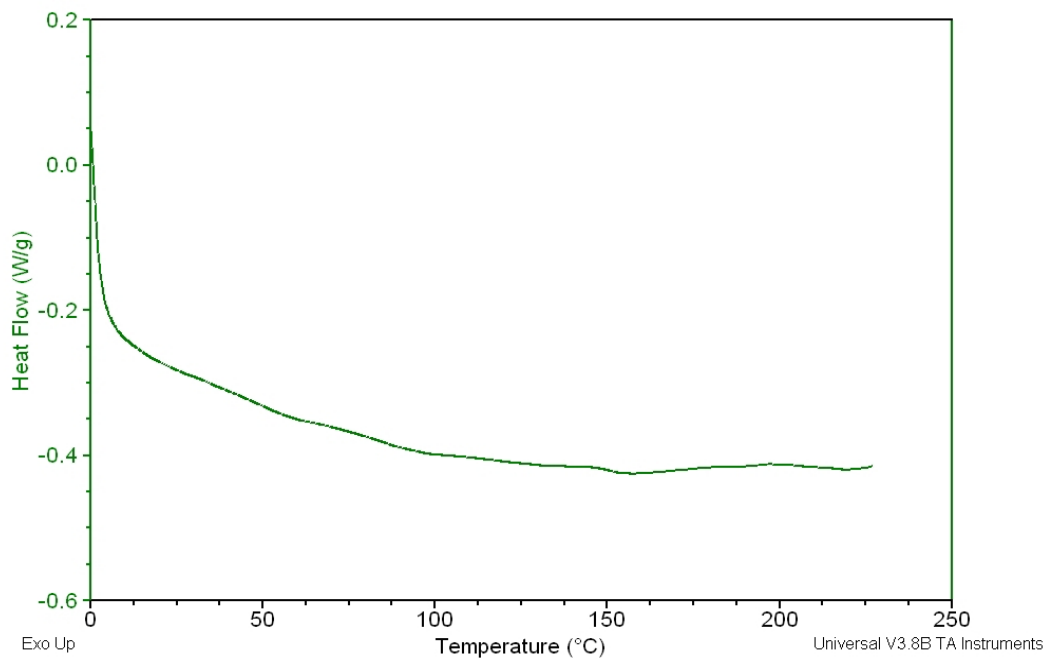
*Obr.2.1.1* zobrazuje průběh tepelného toku vzorkem [W/g] v závislosti na teplotě, vyhodnocený z DSC měření vzorku při rychlosti ohřevu 10°C/min od 0°C do 230°C v atmosféře dusíku 50ml/min.

*Pozn.: DSC – Diferenciální Skenovací Kalorimetrie - metoda měření průběhu přísunu tepelné energie tak, aby teploty vzorku a referenčního vzorku byly stejné.*

Sample: ACHATGRAU  
Size: 6.3200 mg

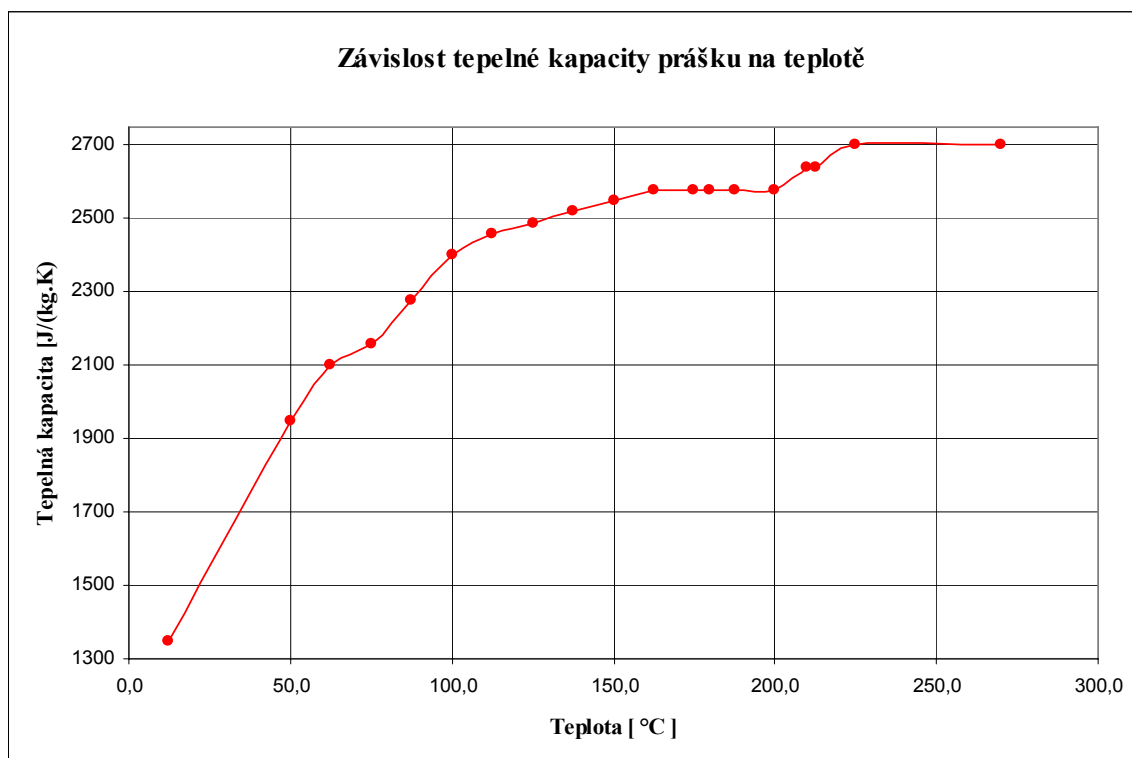
DSC

Instrument: DSC Q100 V5.1 Build 191



obr.2.1.1

Z tohoto průběhu byla vyhodnocena závislost tepelné kapacity  $c_{pp} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  prášku na teplotě [°C] (obr.2.1.2)



obr.2.1.2



## 2.2 Procesní informace

Procesní parametry předepsané výrobcem prášku

Parametr	Hodnota	Jednotka
Kontaktní teplota	220 - 230	°C
Doba želírování	40	s
Teplota vyjmutí kůže	40 - 55	°C
Smrštění	0,8 - 1,2	%

## 2.3 Parametry kůže

### 2.3.1 Parametry kůže udávané výrobcem

Výrobcem prášku udávané parametry vztahující se k laboratorně vyrobenému vzorku kůže

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Metoda měření
Hustota	1,1	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53 420
Pevnost v tahu	11	MPa	DIN 53 455
Mezní prodloužení	350	%	DIN 53 455
Tvrdost	74	Shore A	DIN 53 455
Mlžení 3h při 100°C	>90	% ( odrazivosti )	DIN 75 201
Poškození chladem	-37	°C	ASTM D746

### 2.3.2 Naměřené parametry kůže

Parametry vzorku kůže naměřené přístrojem Netzsch HFM 436/3/1 Lambda

Teplota [ °C ]	Tepelná vodivost [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	Tepelný odpor [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]	Teplotní gradient [ $K \cdot m^{-1}$ ]
20,34	0,084752	0,069645	3171,04
29,47	0,088133	0,066973	3151,51
38,80	0,091861	0,064254	3134,40
48,36	0,096320	0,061280	3110,46
61,11	0,101196	0,058327	3288,46
70,81	0,104265	0,056610	3273,14

Pro výpočty byl použit předpoklad lineárního průběhu závislosti tepelné vodivosti na teplotě.

### 3. Analytické řešení tepelné bilance procesu slush molding

#### 3.1 Nestacionární vedení tepla

V nestacionárním teplotním poli se teplota v určitém místě mění též s časem. Časově závislé pak jsou i teplotní gradienty a jim úměrné hustoty tepelných toků. V prostředí bez vnitřních zdrojů tepla ( $\dot{Q}^{(g)} = 0$ ) a s neproměnnou tepelnou vodivostí popisuje tento neustálený zvláštní typ přenosu tzv. Fourierova rovnice,

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q}^{(g)} \quad (3.1)$$

(platí pro tuhé látky, kde jsou složky vektoru rychlostí  $\vec{u}$  a tenzoru rychlosti deformace nulové)

kterou lze psát ve tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (3.2)$$

kde

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3.3)$$

je tzv. součinitel teplotní vodivosti. Fourierovu rovnici řešíme společně s počátečními a okrajovými podmínkami. Vlastní analytické nebo numerické řešení konkrétních úloh je komplikovanější než při řešení úloh stacionárních.

Při ohřevu (chlazení) tuhých těles závisí rychlost přívodu (odvodu) tepla na velikosti termických odporů, které „brzdí“ přenos tepla mezi okolním prostředím a vlastním tělesem v bilancovaném kontrolním objemu. V zásadě jde o dva typy termických odporů, a to odpor

konduktivní  $R_{T|\lambda}$  neboli vnitřní a konvektivní  $R_{T|\alpha}$ , který se též označuje jako vnější. Poměrem těchto odporů je definován velmi důležitý bezrozměrný komplex tzv. Biotova čísla  $Bi$ , pro které platí

$$Bi = \frac{\text{vnitřní\_termický\_odpor}}{\text{vnějš\_termický\_odpor}} = \frac{R_{T|\lambda}}{R_{T|\alpha}} = \frac{\alpha L}{\lambda}$$

Numerická hodnota tohoto bezrozměrného argumentu poskytuje informaci o tom, který z obou termických odporů bude v daném případě dominantní. Z praktického hlediska mohou nastat tyto tři případy:

$$Bi \ll 1$$

V úlohách tohoto typu dominuje vnější konvektivní odpor, teplotní gradienty uvnitř vlastního tělesa jsou zanedbatelné. Nastává u těles s malým charakteristickým rozměrem (malé částice, dráty, tenké plochy), vysokou tepelnou vodivostí (kovy) a v obklopujícím prostředí s nízkou hodnotou  $\alpha$  (vzduch nebo jiné plyny).

$$Bi \gg 1$$

V tomto případě dominuje konduktivní vnitřní odpor, vnější konvektivní odpor je zanedbatelný. Nastává v podmínkách opačných než  $Bi \ll 1$ , tj. např. v tělesech větších rozměrů s nízkou tepelnou vodivostí (nekovy) a v prostředí s vysokou hodnotou  $\alpha$  (při fázových přeměnách). Teplota povrchu se v tomto případě liší od teploty prostředí jen velmi málo, v mezních případech můžeme zaznamenat  $T_f = T_s$  (teplota okolí je rovna teplotě stěny tělesa).

$$Bi \approx 1$$

Je zřejmé, že v těchto situacích jsou oba termické odpory téhož řádu, ani jeden z nich nelze zanedbat. V praxi přichází nejčastěji v úvahu.

## 3.2 Aplikace nestacionárního vedení tepla na proces slush molding

### 3.2.1 Odvození vztahů pro vedení tepla poloneomezeným prostředím

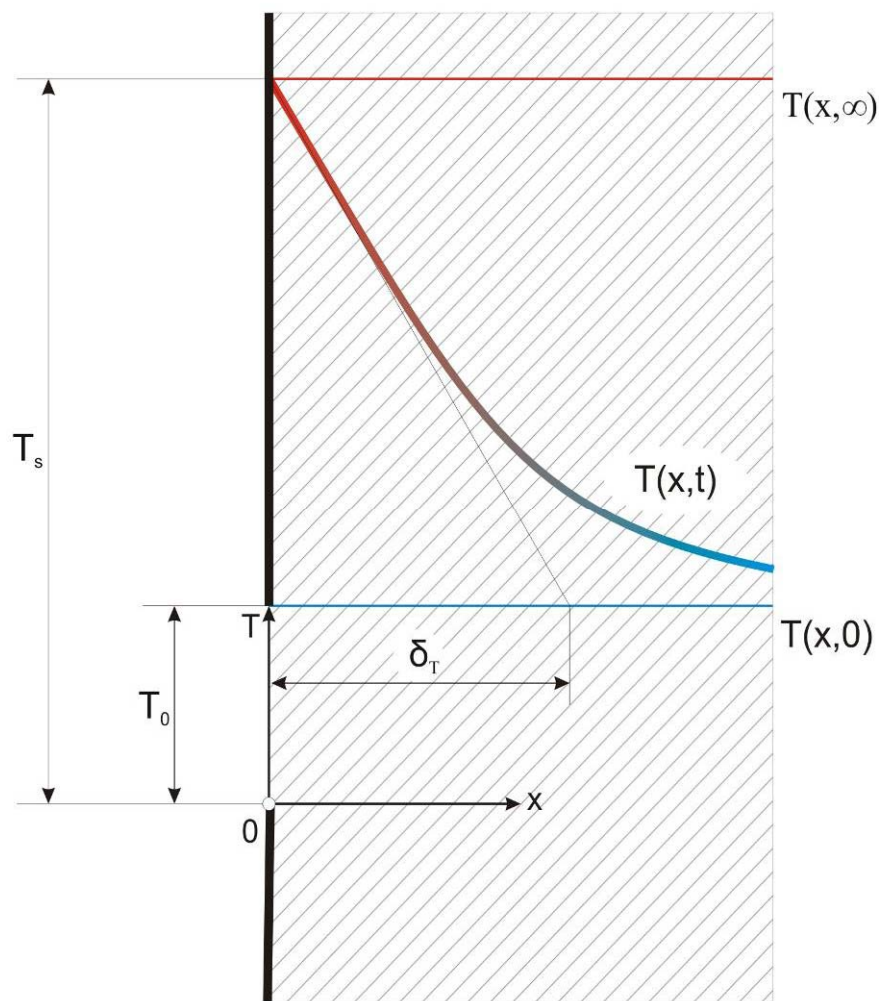
Při procesu slushování lze uvažovat případ  $Bi \gg 1$ . Předpokládá se konstantní teplota formy  $T_s$  a vysoký součinitel přestupu tepla  $\alpha$  do spékaného prášku. Řešení úlohy této kategorie proto přísluší okrajová podmínka I. druhu (tzv. Dirichletova), která definuje

$$T(t, x = 0) = T_s(t)$$

Pro případ jednorozměrného vedení tepla v kartézských souřadnicích má Fourierova rovnice tvar

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

Při zahájení procesu slushování je do formy aplikováno nadbytečné množství polymeru, tzn. všechny prášek se nespeče. Z tohoto důvodu je v době spékání ve formě silná vrstva prášku a tudíž lze tento jev uvažovat jako vedení tepla v tzv. poloneomezeném prostředí.



obr.3.2.1 [7]

Na obr.3.1.1 je schematicky znázorněno poloneomezené prostředí, které mělo až do okamžiku  $t = 0$  všude teplotu  $T_0$  (teplota okolí = studeného prášku). Pokud je v tomto okamžiku náhle zvýšena teplota povrchu na hodnotu  $T_s$ , začne se prostředí prohřívat (kontakt prášku s formou). V této idealizované geometrii bude existovat pouze jediný teplotní gradient a to ve směru osy  $x$  (osa kolmá na povrch formy).

Rovnice (3.4) se bude řešit s počáteční podmínkou

$$\begin{aligned}
 &t < 0 \\
 &T = T_0 \\
 &0 \leq x \leq \infty
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

a okrajovými podmínkami

$$1) \quad x = 0; T = T_s \quad (3.6)$$

$$2) \quad x \rightarrow \infty; T = T_0 \quad (3.7)$$

pro  $t > 0$ .

Použije se předpoklad, že hledané teplotní pole  $T(x, t)$  bude záviset pouze na takové kombinaci proměnných  $x, T$ , pro kterou bude platit

$$T(x, t) = T[\eta'(x^r t^s)] \quad (3.8)$$

Dosazením do rovnice (3.4) vypočte, že je předpoklad splněn pro  $r = 1$  a  $s = -1/2$ , tj.

$$\eta' = x/\sqrt{t} \quad .$$

Dělením této rovnice proměnnou konstantou  $2\sqrt{a}$ , obdržíme novou proměnnou

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad (3.9)$$

Její použitím zůstanou předchozí závěry v platnosti a navíc se zjednoduší formální chod dalšího řešení.

Zavede-li se dále bezrozměrná teplota  $T^+$  normalizovaná maximální teplotní diferencí v soustavě

$$T^+ = \frac{T - T_0}{T_s - T_0} \quad (3.10)$$

plyne dosazením z rovnic (3.9) a (3.10) do Fourierovy rovnice (3.4) obyčejná homogenní diferenciální rovnice

$$\frac{d^2 T^+}{d\eta^2} + 2\eta \frac{dT^+}{d\eta} = 0 \quad (3.11)$$

Príslušné dvě okrajové podmínky plynou z rovnic (3.6) a (3.7)

$$T^+(\eta = 0) = 1 \quad (3.12)$$

$$T^+(\eta \rightarrow \infty) = 0 \quad (3.13)$$

První integrál rovnice (3.11) je

$$\frac{dT^+}{d\eta} = c_1 e^{-\eta^2} \quad ,$$

po druhé integraci

$$T^+ = c_1 \int_0^\eta e^{(-\zeta^2)} d\zeta + c_2 \quad (3.14)$$

Z okrajové podmínky (3.12) plyne  $c_2 = 1$ , z (3.13) bude

$$-1/c_1 = \int_0^\infty e^{(-\zeta^2)} d\zeta = \sqrt{\pi}/2 \quad (3.15)$$

Hledaný nestacionární profil tedy bude,

$$T^+ = \frac{T - T_0}{T_s - T_0} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{(-\zeta^2)} d\zeta \quad (3.16)$$

$$T^+ = 1 - \operatorname{erf}(\eta) = \operatorname{erfc}(\eta) \quad (3.17)$$

Funkce  $\operatorname{erf}(x)$  je Gaussův integrál chyb („error function“), funkce  $\operatorname{erfc}(x)$  je tzv. komplementární funkce integrálu chyb, pro kterou platí  $\operatorname{erf}(x) + \operatorname{erfc}(x) = 1$ .

Z rovnice (3.16) je odvozen pro teplotní gradient výraz

$$\frac{dT}{dx} = (T_s - T_0) \frac{dT^+}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{dx} = -(T_s - T_0) \cdot \frac{e^{-\eta^2}}{\sqrt{\pi}at} \quad (3.18)$$

hustota tepelného toku na povrchu poloprostoru bude

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = (T_s - T_0) \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a t}} \quad (3.19)$$

Celkové množství tepla přivedené do prostředí plochou  $S$  v intervalu od 0 do  $t$  je

$$Q = S \int_0^t q_x dt = S(T_s - T_0) \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a t}} \int_0^t t^{-1/2} dt = 2S(T_s - T_0) \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a t}} \cdot \sqrt{t} \quad (3.20)$$

Z rovnic (3.16) a (3.17) lze vyjádřit vztah

$$T = [\operatorname{erfc}(\eta)(T_s - T_0)] + T_0 \quad (3.21)$$

který dává informaci o teplotě prášku v libovolně zvolené vzdálenosti  $x$  od formy a čase  $t$  na základě znalosti fyzikálních vlastností a počáteční teploty prášku nebo kůži a teploty formy.

### 3.2.2 Výsledky analytického řešení

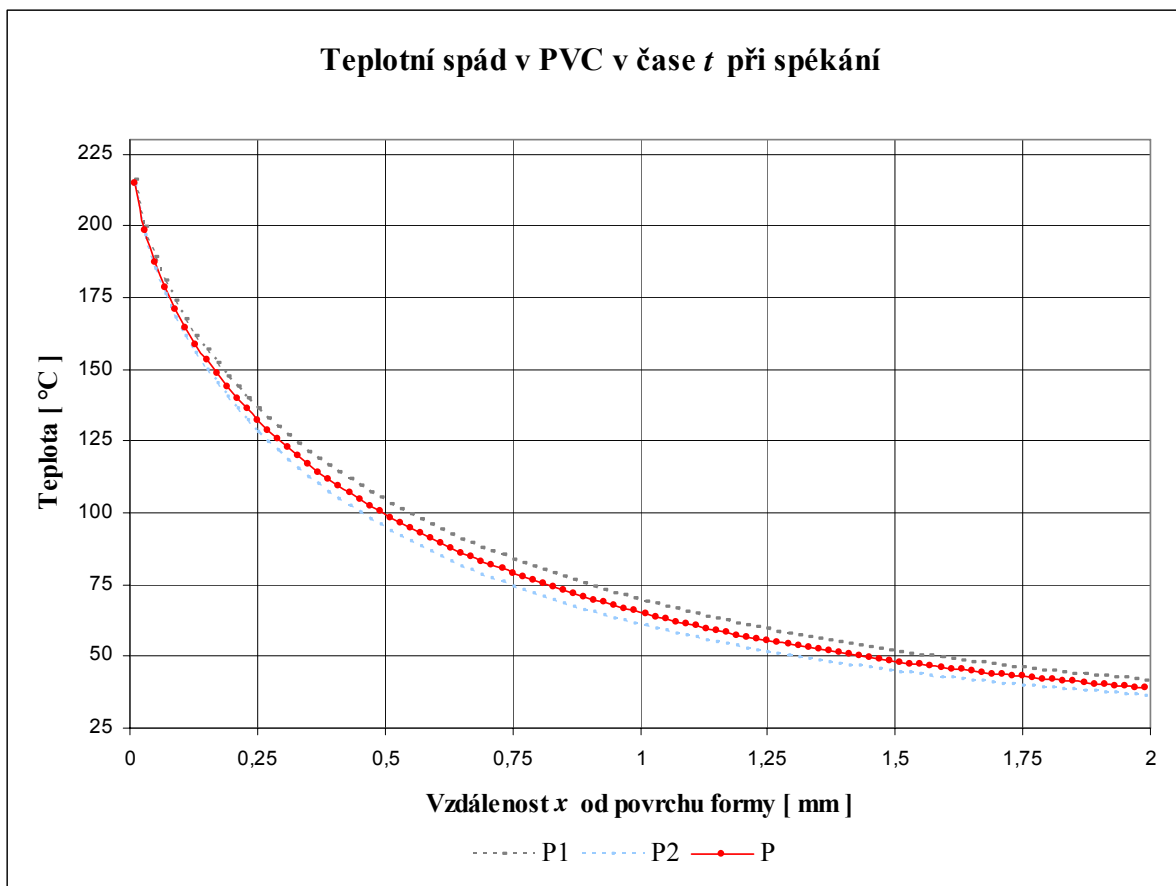
S ohledem na vyjádření Fourierovy rovnice, která je odvozena pro neproměnnou tepelnou vodivost  $\lambda$  a nestlačitelné prostředí, byl výpočet proveden pro dva případy. V prvním případě **P1** jsou pro výpočet použity fyzikální vlastnosti odpovídající prášku, ve druhém případě **P2** jsou použity fyzikální vlastnosti odpovídající výsledné kůži. Hledané řešení se pak bude nacházet mezi těmito krajními případy (pro názornost je zobrazen průběh **P** odpovídající aritmetickému průměru krajních případů).

Pro řešení byly použity následující společné parametry:

Vlastnost	Hodnota	Hodnota	Jednotka
	P1	P2	
Tepelná vodivost	0,1	0,16	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná hmotnost	640	1100	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tepelná kapacita	2400	2700	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Počáteční teplota PVC	25		$^{\circ}\text{C}$
Kontaktní plocha $S$ formy - odpovídá ploše výsledných kůží z mini-slush modulu	0,017956		$\text{m}^2$



**Příklad 1:** Na obr.3.2.2 je znázorněn teplotní spád v PVC v čase  $t = 4s$  při spékání. Počáteční teplota formy  $T_s = 230^\circ C$ .

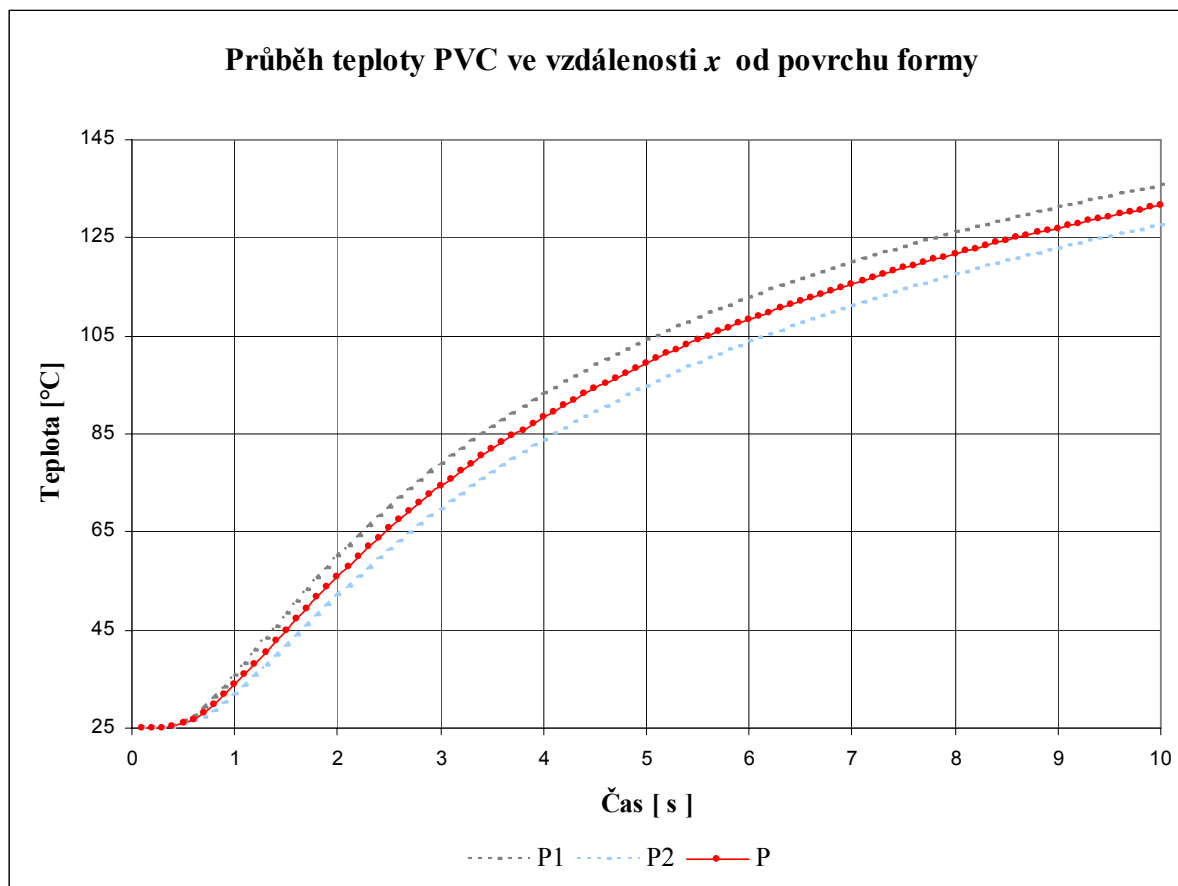


obr.3.2.2 (průběh vypočtený dle vlastností: P1–prášku; P2–kůže; P-průměr)

Tomu odpovídají následující hodnoty:

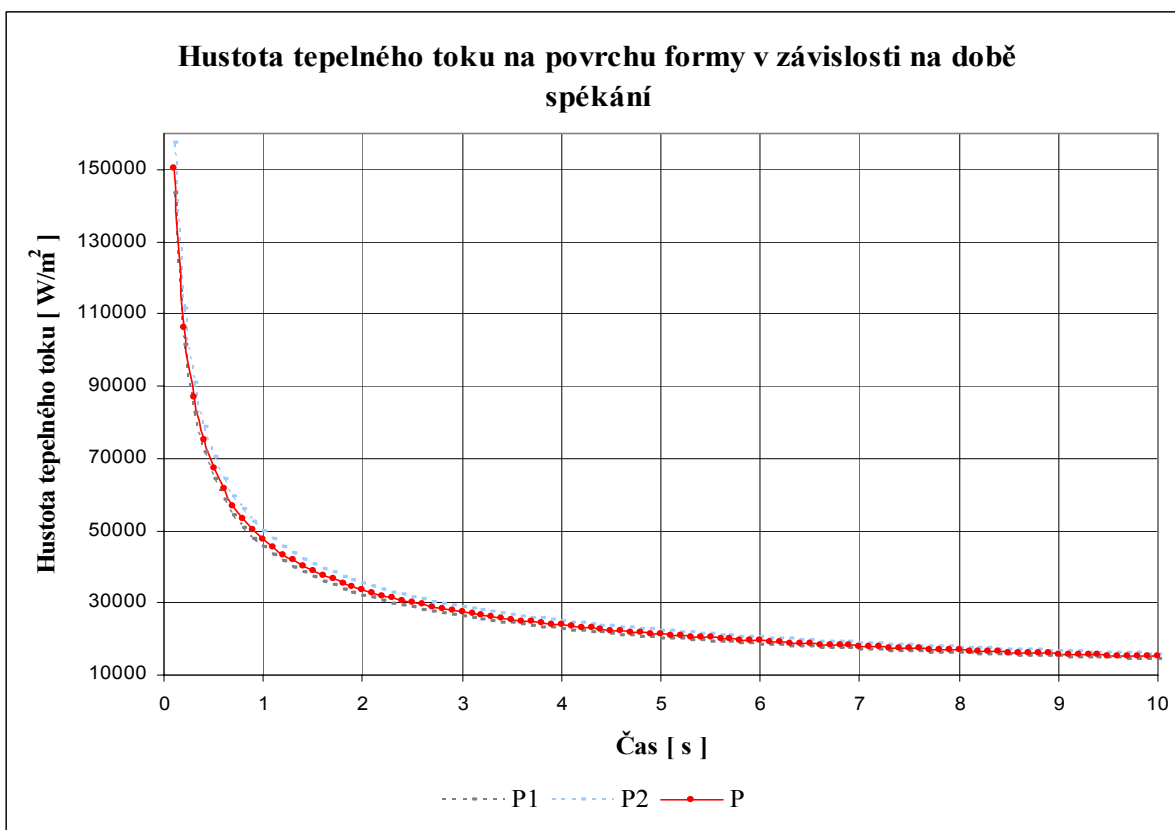
Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Hustota tepelného toku na povrchu formy - P1	143342	[ W/m <sup>2</sup> ]
Hustota tepelného toku na povrchu formy - P2	157579	[ W/m <sup>2</sup> ]
Hustota tepelného toku na povrchu formy - P	150460	[ W/m <sup>2</sup> ]
Celkové množství tepla přivedeného do prostředí plochou S v intervalu od 0 do $t$ - P1	515	[ J ]
Celkové množství tepla přivedeného do prostředí plochou S v intervalu od 0 do $t$ - P2	905	[ J ]
Celkové množství tepla přivedeného do prostředí plochou S v intervalu od 0 do $t$ - P	710	[ J ]

**Příklad 2:** Na *obr.3.2.3* je znázorněn průběh teploty v čase  $t = 0 - 10s$  ve vzdálenosti  $x = 0,7mm$ . Počáteční teplota formy  $T_s = 230^\circ C$

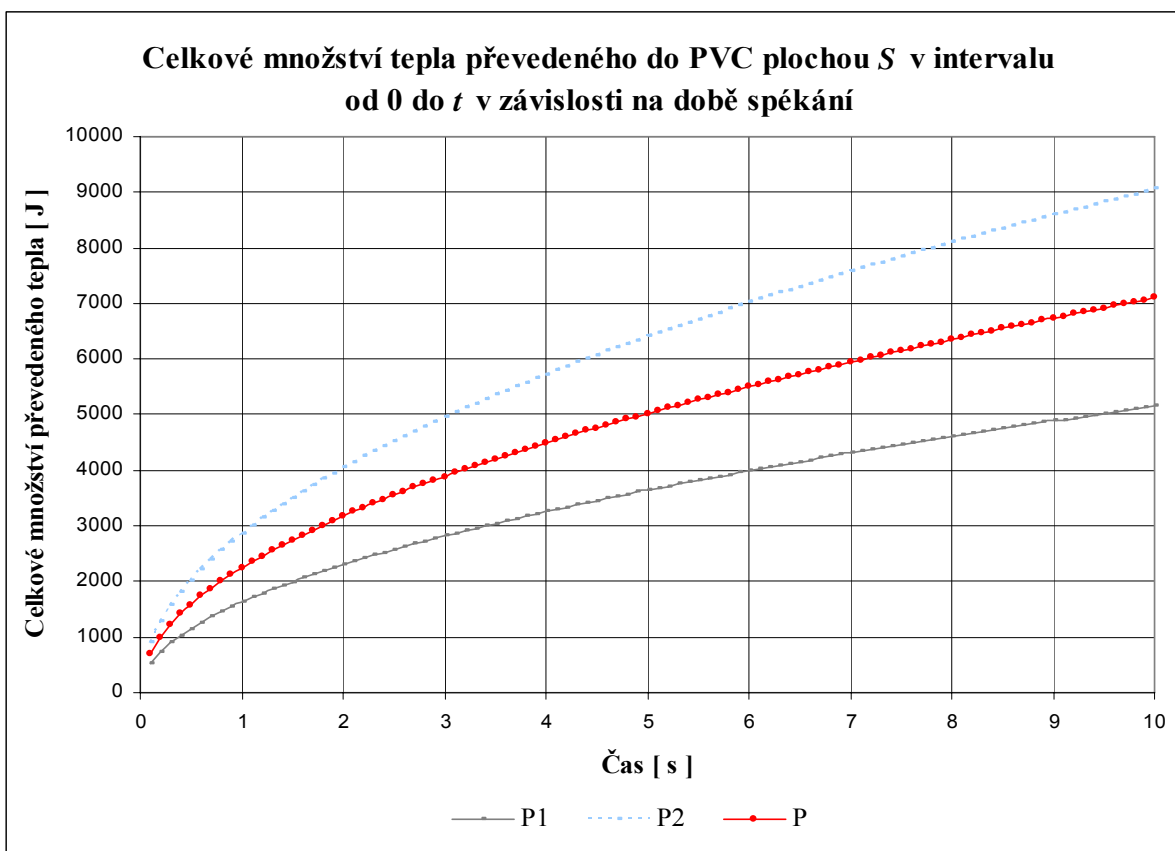


*obr.3.2.3 (průběh vypočtený dle vlastností: P1-prášku; P2-kůže; P-průměr)*

Z průběhů na *obr.3.2.3* a *obr.3.2.5* je zřejmé, že materiálové vlastnosti mají významný vliv na výsledný průběh teploty resp. dodaného tepla. Velká teplotní závislost materiálových vlastností PVC prášku tak analytický výpočet znevýhodňuje pro reálné použití.



Obr.3.2.4 ( průběh vypočtený dle vlastností: P1–prášku; P2–kůže; P-průměr)



obr.3.2.5 ( průběh vypočtený dle vlastností: P1–prášku; P2–kůže; P-průměr)

## 4. Numerická simulace procesu slush molding

Jedná se o první nástin řešení procesu slush molding pomocí numerické simulace metodou konečných prvků. Řešení zahrnuje pouze fázi aplikace prášku. Jejím cílem je ověřit možnosti numerické metody v porovnání s analytickým výpočtem a experimentem a získat představu o problémech a výhodách, které přináší.

Numerická simulace byla provedena procesorem MKP Msc.Marc 2005r3 za použití pre- a post- procesoru MSC Mentat 2005r3.

### 4.1 Model pro numerickou simulaci

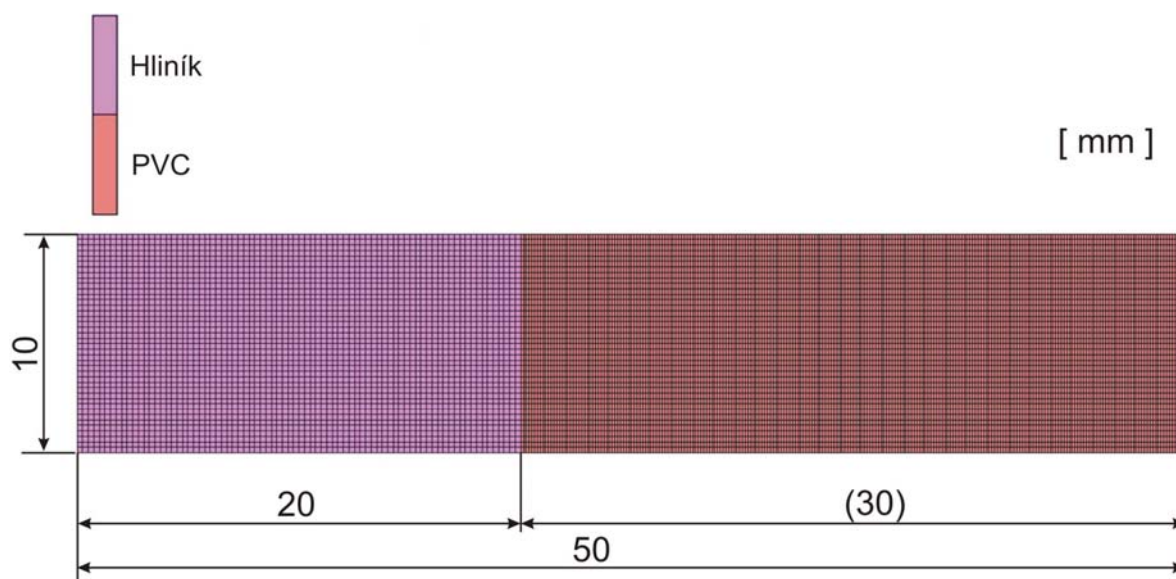
Předpoklady pro řešení jsou homogenní teplotní pole na povrchu formy a rovnoměrný průběh slushování v celé její ploše. Za těchto předpokladů bude proměnný teplotní spád pouze ve směru kolmém k povrchu formy.

Pro simulaci byl použit 2-D model, který představuje řez vrstvou prášku a hliníkovou deskou použitou v mini-slush modulu, aby bylo možné výsledky simulace a experimentu vzájemně porovnat a vyhodnotit.

Parametry modelu:

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Rozměry modelu	10 x 50	mm
Typ elementů	quad ( čtyřhran )	
Celkový počet elementů	12800	
Počet elementů představujících formu	3200	
Počet elementů představujících PVC	9600	

Na obr.4.1.1 je vizualizace 2D modelu



obr.4.1.1 – vizualizace 2-D modelu

## 4.2 Nastavení parametrů numerické simulace

### 4.2.1 Materiálové vlastnosti

Pozn.: parametry udávané tabulkou vyjadřují body, mezi kterými je průběh závislosti lineární

#### 4.2.1.1 Hliník

Ne-mechanické materiálové vlastnosti -> Přenos tepla:

Parametr	Hodnota	Jednotka
Typ	Izotropní	
Metoda	Vložená hodnota	
Tepelná vodivost	177	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tepelná kapacita	696	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná hmotnost	2700	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

#### 4.2.1.2 PVC

Mechanické materiálové vlastnosti -> Izotropní:

Parametr	Hodnota	Jednotka
Youngův modul pružnosti	100	Pa
Poissonovo číslo	0,3	-
Měrná hmotnost	1000	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

-> *Teplotní roztažnost:*

teplotní roztažnost je definována tabulkou:

Teplota [ °C ]	Hodnota [ K <sup>-1</sup> ]
20 - 179	0
180 - 210	-0,01394
210 - 270	0

*Ne-mechanické materiálové vlastnosti -> Přenos tepla:*

Parametr	Hodnota	Jednotka
<i>Typ</i>	<i>Izotropní</i>	
<i>Metoda</i>	<i>Vložená hodnota</i>	
<i>Měrná hmotnost</i>	1000	kg·m <sup>-3</sup>

*Tepelná vodivost:* je definována tabulkou:

Teplota [ °C ]	Hodnota [ W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
0	0,1
20	0,1
250	0,17

*Tepelná kapacita:*

Vztahy pro vedení tepla, které používá řešič pro výpočet hodnot při simulaci, jsou odvozeny pro nestlačitelné prostředí (měrná hmotnost = konst.). Aby bylo možno postihnout změnu měrné hmotnosti PVC v závislosti na teplotě, byly hodnoty tepelné kapacity upraveny dle vztahu  $c_{pu} = \frac{\rho \cdot c_p}{1000}$ , kde  $c_{pu}$  je upravená tepelná kapacita,  $c_p$  je tepelná kapacita PVC a  $\rho$  je měrná hmotnost PVC.

Ve vztazích pro vedení tepla vždy vystupuje člen  $\rho \cdot c_{pu}$ , je-li tedy nastavena hodnota  $\rho = 1000$  a  $c_{pu}$  závislé na teplotě, pak se ve vztazích objeví teplotně závislý součin  $\rho \cdot c_p$ .

tabulka tepelné kapacity:

Teplota [ °C ]	Hodnota $c_p$ [ J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Hodnota $c_{pu}$ [ J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
12,5	1350	864
75	2160	1382
100	2400	1536
150	2550	1632
180	2580	1651
200	2580	2541
210	2640	2904
225	2700	2970
270	2700	2970

## 4.2.2 Počáteční podmínky

### 4.2.2.1 Počáteční teplota formy

Tato podmínka byla aplikována na všechny uzly elementů formy.

Parametr	Hodnota	Jednotka
<i>Horní mez</i>	220 - 250	°C

### 4.2.2.2 Počáteční teplota prášku

Tato podmínka byla aplikována na všechny uzly elementů PVC.

Parametr	Hodnota	Jednotka
<i>Horní mez</i>	25	°C

## 4.2.3 Okrajové podmínky

### 4.2.3.1 Tepelný tok formy

Tepelný tok formy představuje výkon dodávaný topnými patronami. Jeho hodnoty jsou odvozeny z výkonu nastaveného na mini-slush modulu pro udržení požadovaných teplot.

Tato podmínka byla aplikována na všechny elementy formy.

*Tepelný tok:*

Požadovaná teplota formy [ °C ]	Tepelný tok [ W·m <sup>-3</sup> ]
210	1894464
220	1943459
230	1992450
240	1992450
250	2138560

#### 4.2.3.2 Fixace formy

Uzlům elementů představujících hliníkovou desku byly odebrány stupně volnosti, aby nemohlo dojít k jejich pohybu vlivem teplotní roztažnosti PVC.

*Stupně volnosti:*

Parametr	Hodnota
<i>Posuv x</i>	0
<i>Posuv y</i>	0
<i>Posuv z</i>	0
Rotace x	0
Rotace y	0
Rotace z	0

#### 4.2.3.3 Fixace PVC

Zamezení pohybu uzlů elementů představujících PVC ve směru rovnoběžném s rovinou formy -> požadované smrštění ve směru kolmém na rovinu formy.

*Stupně volnosti:*

Parametr	Hodnota
<i>Posuv x</i>	-
<i>Posuv y</i>	0
<i>Posuv z</i>	-
Rotace x	-
Rotace y	-
Rotace z	-



#### 4.2.4 Nastavení úlohy

Nastavení úlohy pro sdružený (tepelný i mechanický) výpočet, celková doba trvání experimentu 10 s s nastavením adaptivního časového kroku.

Parametr	Hodnota	Jednotka
<i>Celkový čas úlohy</i>	10	s

*Adaptivní krokování:*

Parametr	Hodnota	Jednotka
<i>Počáteční velikost časového kroku</i>	1,E-05	s
<i>Minimální velikost časového kroku</i>	1,E-07	s
<i>Maximální velikost časového kroku</i>	0,01	s
<i>Maximální počet časových kroků</i>	99999	

#### 4.2.5 Nastavení řešiče

Byla načtena předešlá úloha, počáteční a okrajové podmínky

Úloha byla nastavena na rovinnou (2-D)

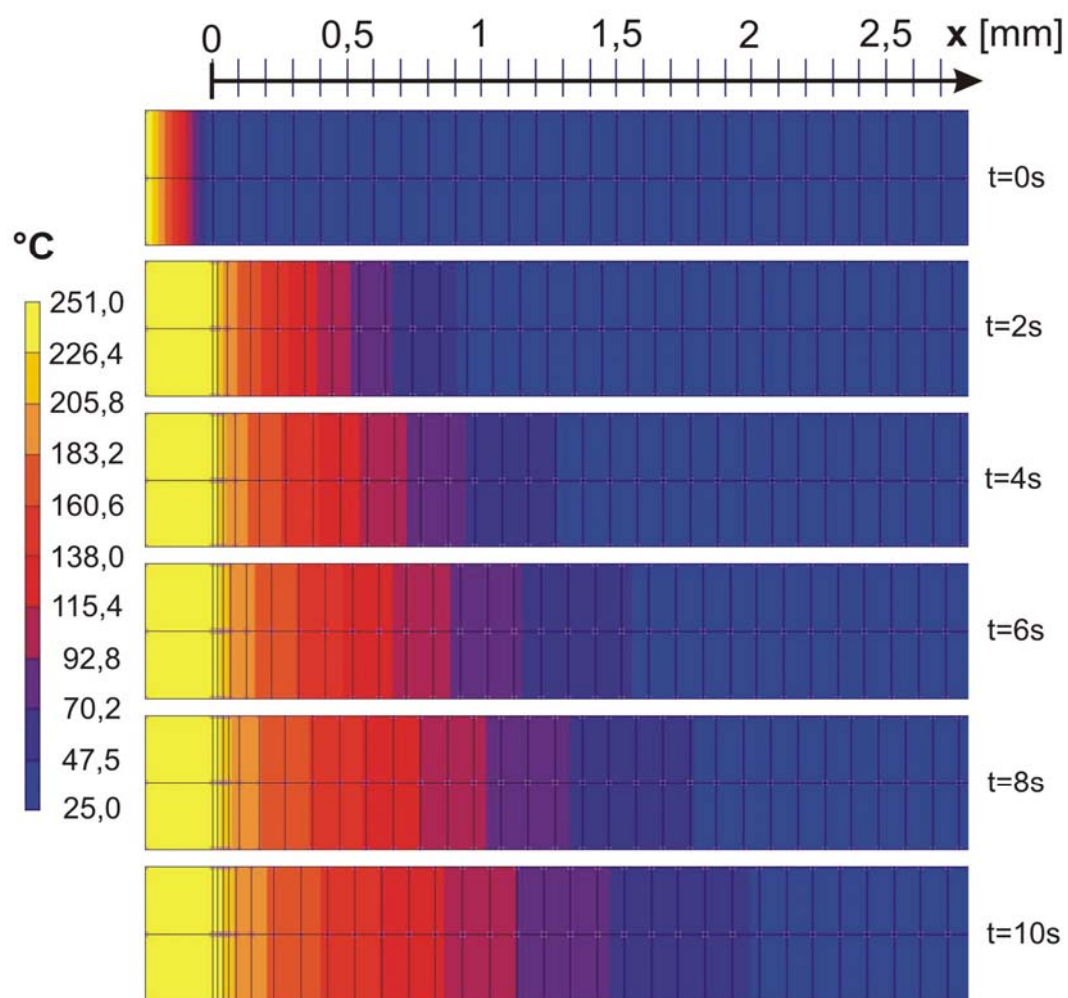
Typ elementů byl nastaven na *Sdružený*

Pro elementy hliníkové formy byl použit typ elementů: *Rovinné pro výpočet přenosu tepla (Quad - 39)*

Elementy PVC byly nastaveny na typ: *Rovinné pro výpočet přenosu tepla a mechanického namáhání (Quad -11)*

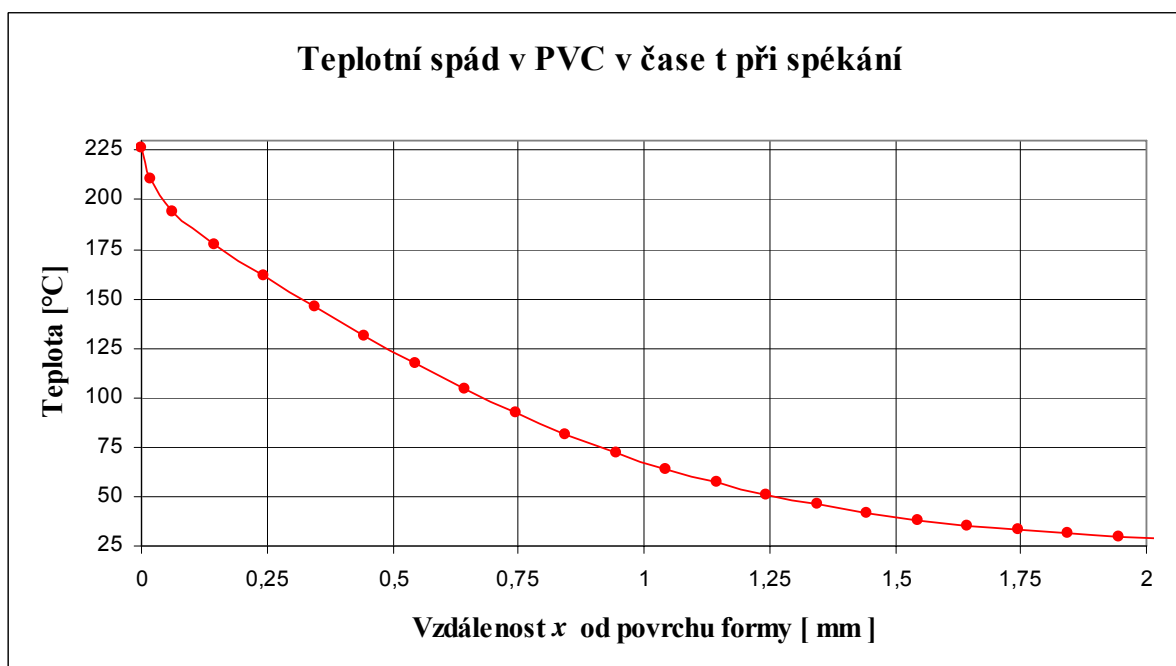
### 4.3 Výsledky numerické simulace

Ukázka vizualizace průběhu teplotního pole v PVC pro teplotu formy  $T_s = 250^\circ\text{C}$  v čase  $t = 0\text{s}$  až  $t = 10\text{s}$  (obr.4.3.1)



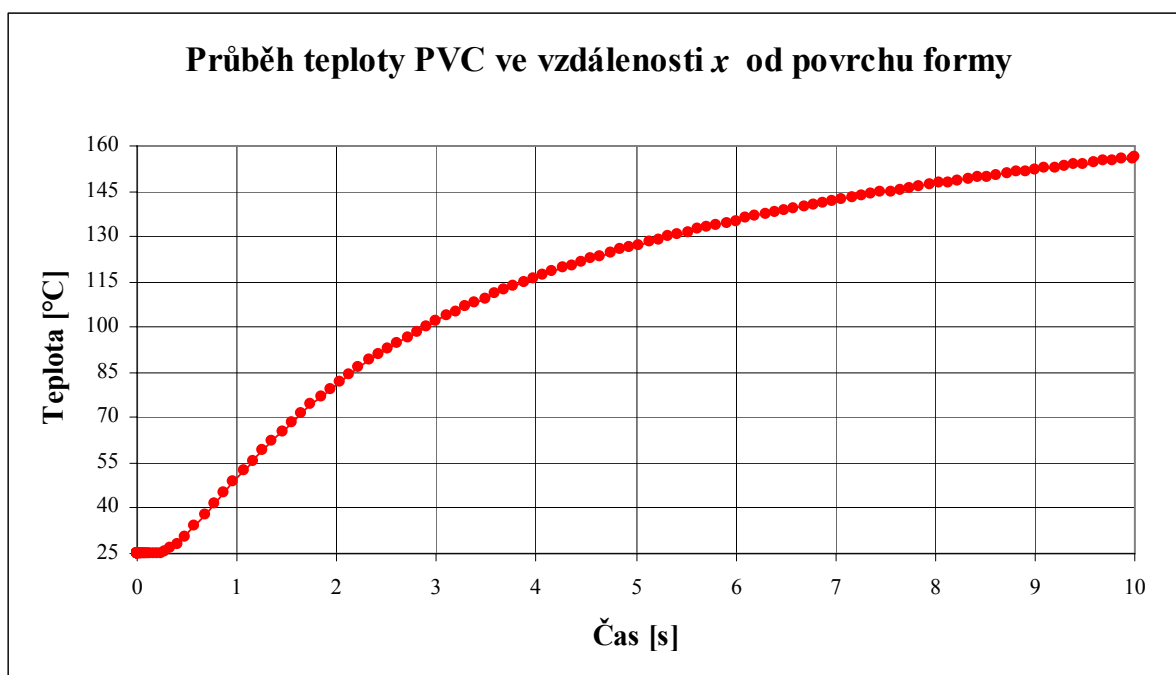
obr.4.3.1

**Příklad 1:** Na *obr.4.3.2* je znázorněn teplotní spád v PVC v čase  $t = 4s$  při spékání. Počáteční teplota formy  $T_s = 230^\circ C$ .



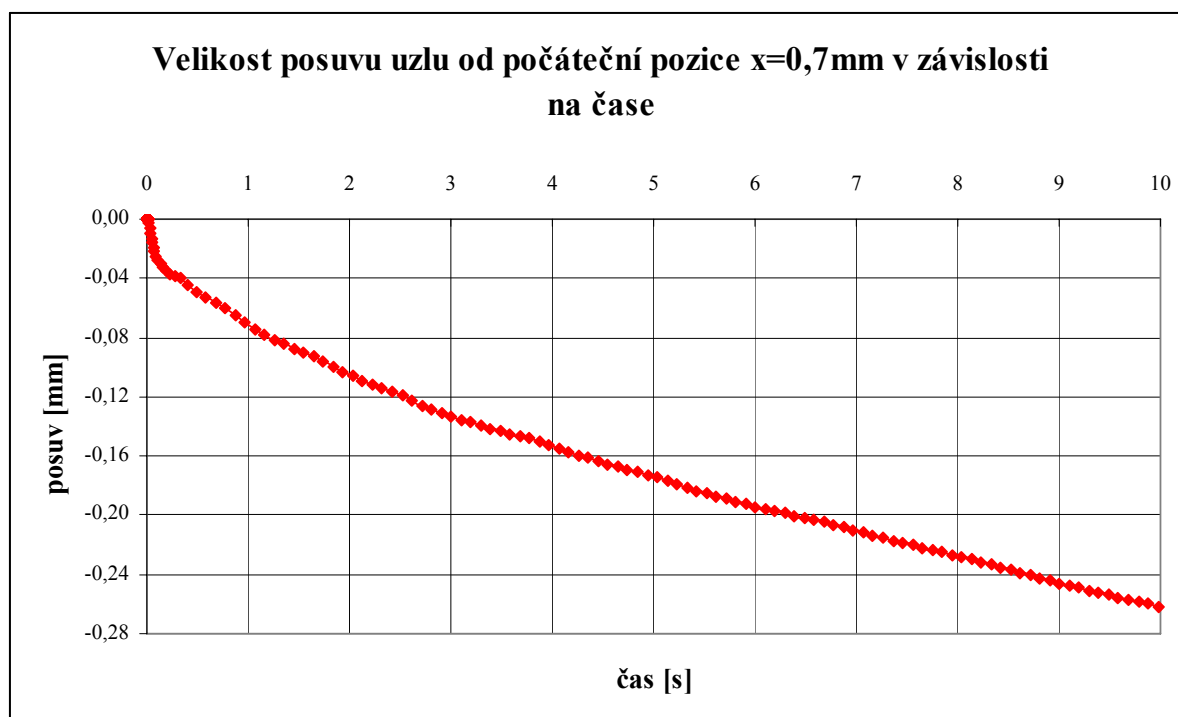
*obr.4.3.2*

**Příklad 2:** Na *obr.4.3.3* je znázorněn průběh teploty v čase  $t = 0 - 10s$  ve vzdálenosti  $x = 0,7mm$ . Počáteční teplota formy  $T_s = 230^\circ C$ .



*obr.4.3.3*

Na obr.4.3.4 je znázorněn průběh velikosti posuvu uzlu od počáteční pozice  $x = 0,7\text{mm}$  v čase  $t = 0 - 10\text{s}$ . Počáteční teplota formy  $T_s = 230^\circ\text{C}$



obr.4.3.4

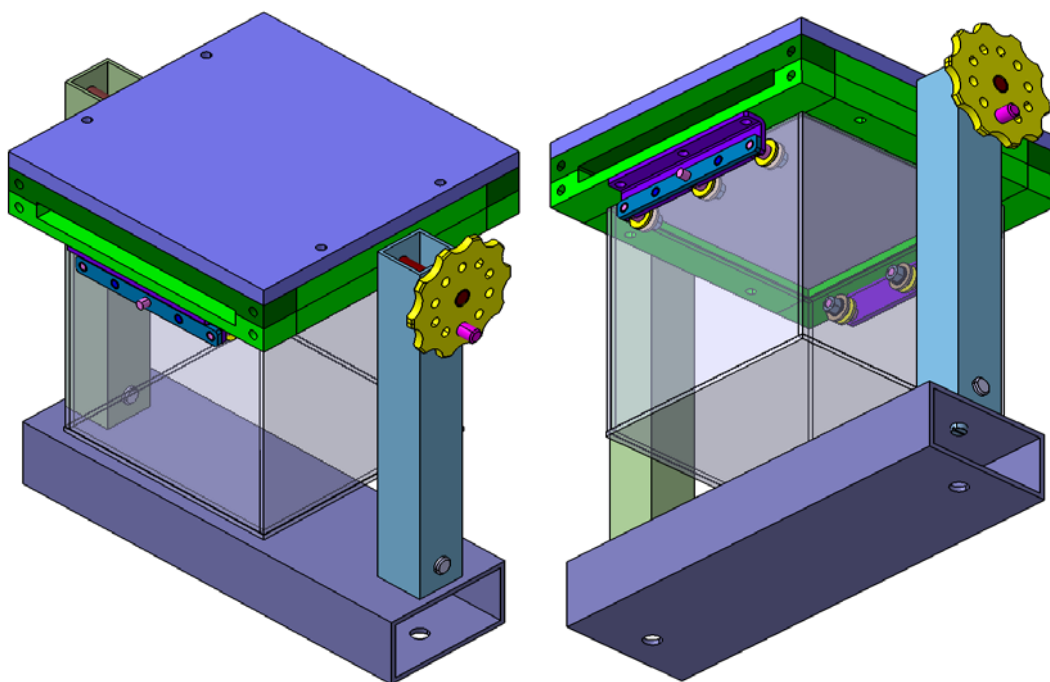
## 5. Experimentální určení tepelné bilance při procesu slushování

Veškeré níže popsané experimenty byly provedeny na mini-slush modulu.

### 5.1 Mini-slush modul

Z dostupných informací je metodika posuzování vhodnosti použití práškových směsí k technologii slush molding používaná výrobci prášků následující. V peci je na ohřátou kovovou desku aplikován posypem prášek a dále za působení tepla želírován. Po uplynutí požadované doby je deska z pece vyjmuta a zchlazena. Následně jsou určeny materiálové vlastnosti vzniklé kůže.

Mini-slush modul (*obr.5.1.1 a obr.5.1.2*) je malé experimentální zařízení navržené za cílem simulování reálného slush molding výrobního procesu v laboratorních podmínkách, na kterém bude možno věrně napodobit průběh všech fází výroby kůže.



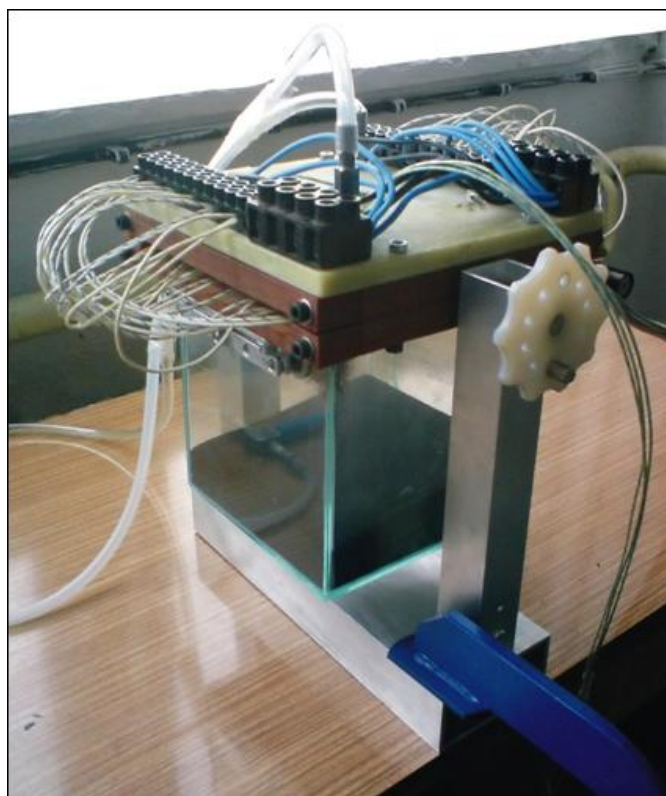
*obr.5.1.1 – model mini-slush modulu*

Základem modulu je hliníková deska, do které jsou ve dvou protilehlých bočních hranách zasazeny topné patrony. Tato deska představuje vyhřívanou formu. Na desku jsou instalována tři teplotní čidla. Hlavní teplotní čidlo, které slouží pro nastavení požadované

teploty desky je zavedeno vyvrtaným otvorem těsně pod povrch aplikační strany desky, zbylá dvě kontrolní čidla jsou umístěna na opačné straně desky. Pomocí teplotních čidel a regulátoru napájecího proudu topných patron lze nastavit požadovanou teplotu desky. Teplotní čidla jsou připojena přes modul pro získávání dat (Data Acquisition Module) ADAM-5000 k počítači, který zobrazuje a zaznamenává výstupní hodnoty pomocí software Advantech® Genie 3.04. K aplikaci prášku slouží nádoba, která se přichytí k desce pomocí závěsných kolíků a matice. Celý systém nádoby s deskou je rotačně uchycen na stojanu. Chlazení desky je zajištěno tlakovým vzduchem, který je vháněn hadičkami do prostoru mezi deskou a horním krytem.

Základní parametry modulu:

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Rozměry desky	14 x 14 x 2	cm
Materiál desky	hliník	
Počet topných patron	18	
Napájecí napětí patron	230	V
Maximální výkon patrony	200	W
Teplotní čidla	termočlánky typ K	
Počet teplotních čidel	3	
Rozměry výsledné kůže	13,4 x 13,4	cm



*obr.5.1.2 – mini-slush modul*

## 5.2 Cíle experimentů

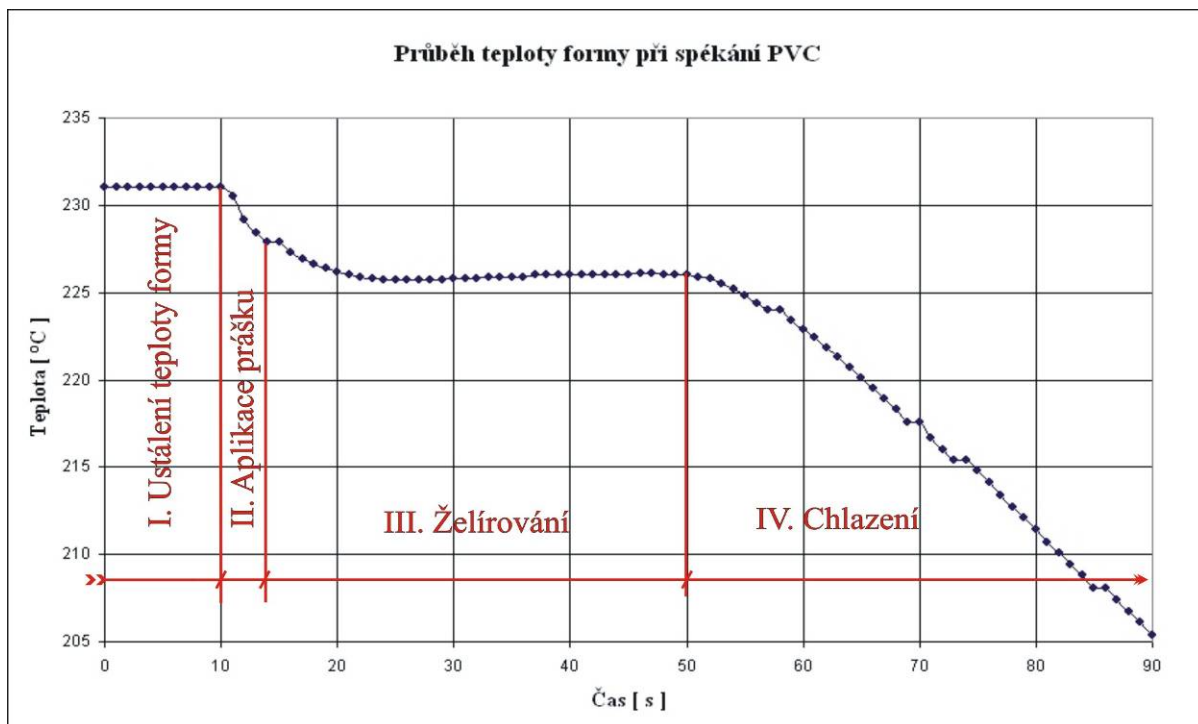
Cílem experimentů bylo:

- stanovit tepelnou bilanci procesu slush-molding pro různé hodnoty teploty formy a doby aplikace prášku
- získání referenčních dat pro porovnání s analytickým výpočtem a numerickou simulací

Společnými parametry byla doba želírování  $t_2 = 30s$ , požadovaná kvalita vnějšího povrchu = povrch na straně nádoby (hladký, bez zrn nespečeného prášku) a kvalita vnitřního povrchu = povrch na straně formy (nespálená místa).

Provedeným experimentům předcházela sada zkušebních měření, na jejichž základě byla vyhodnocena touto prací sledovaná oblast teplot a doby aplikace prášku. Souhrnná tabulka těchto měření viz. *příloha 1*.

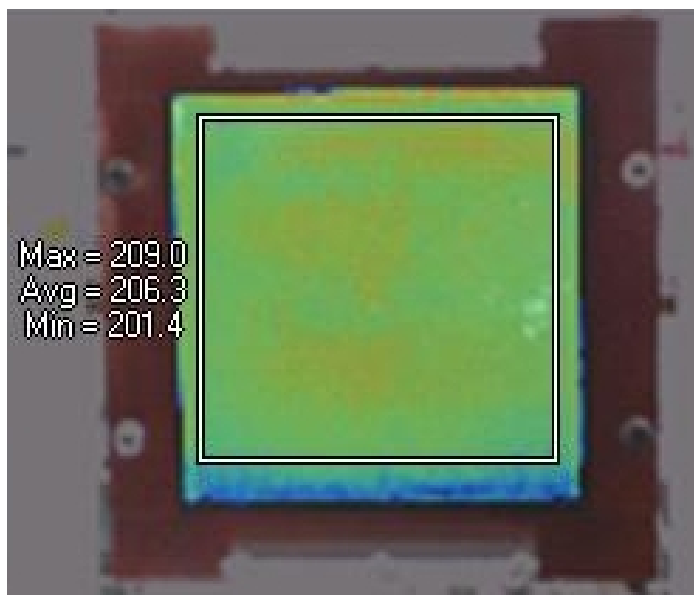
## 5.3 Průběh experimentů



obr.5.2.1

1. Forma s připojenou nádobou obsahující prášek byla ohřáta na požadovanou teplotu a na ní udržována => dosažení rovnováhy tepla dodaného patronami a ztrátového tepla (Fáze I. *obr.5.2.1*).
2. Forma byla přetočena o 180° tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozprostření a pokud možno konstantní vrstvy prášku po celém povrchu vyhřívané desky. Dojde k poklesu teploty formy vlivem odebrání tepla práškem (Fáze II. *obr.5.2.1*)
3. Po uplynutí doby aplikace  $t_1$  byla forma přetočena do výchozí pozice tak, aby se přebytečný prášek přesypal zpět do nádoby.
4. Během doby želírování  $t_2$  (Fáze III. *obr.5.2.1*) dochází k opětovnému růstu teploty formy. V této fázi byla odpojena nádoba s práškem.
5. Po uplynutí doby želírování  $t_2$  bylo odpojeno napájení patron a spuštěno chlazení formy (Fáze IV. *obr.5.2.1*). Doba chlazení je přibližně 8 minut.
6. Kůže byla z formy sejmuta při teplotě cca. 60°C
7. Laboratorními váhami MEOPTA A3/200 16501 byla změřena hmotnost kůže a pomocí digitální posuvky v 15 bodech plochy určena její průměrná tloušťka.

Na *obr.5.2.2* je snímek pořízený termokamerou, v průběhu želírování PVC, pro kontrolu rovnoměrnosti ohřevu desky mini-slush modulu



*obr.5.2.2*



## 5.4 Výsledky experimentů

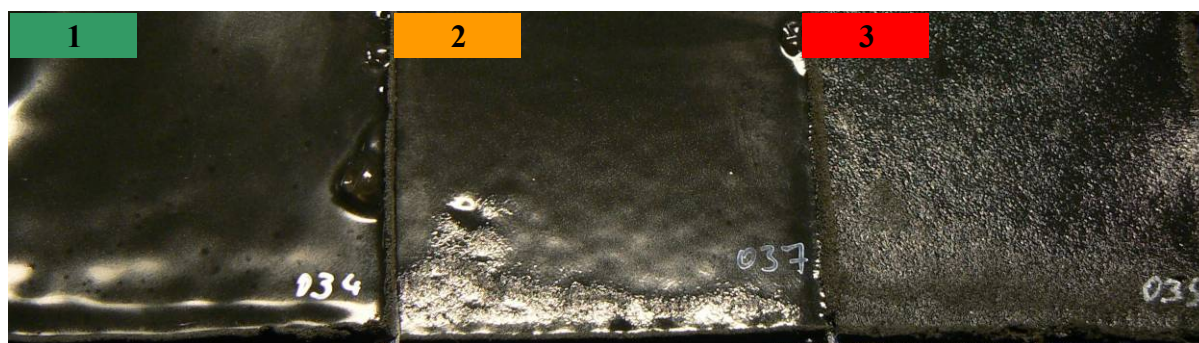
V průběhu experimentů byly vyrobeny 2-3 kůže za shodných podmínek pro většinu kombinací teploty formy a časů aplikace prášku, aby se snížila případná chyba měření. K vyhodnocení experimentů byly použity průměrné hodnoty shodných měření.

Následující tabulka ukazuje kombinace provedených měření:

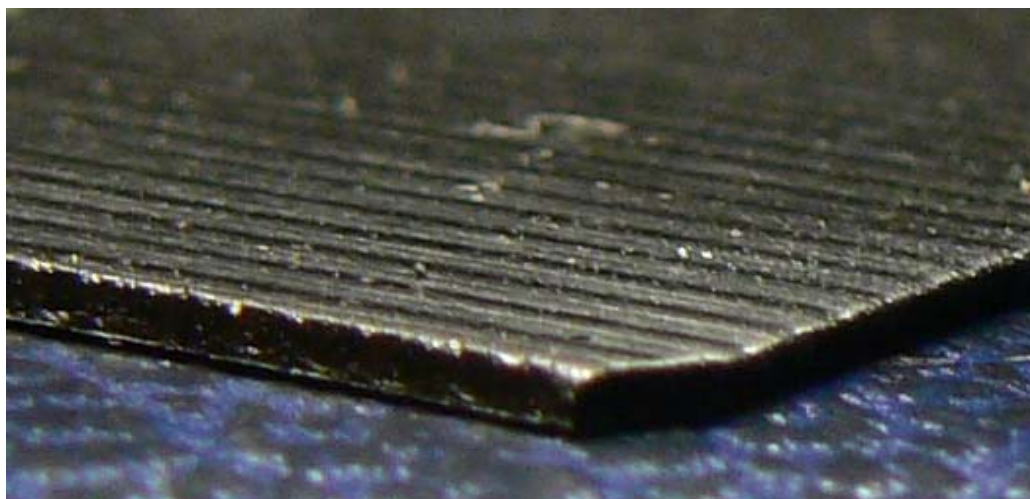
• - uskutečněné měření		Doba aplikace prášku [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [ °C ]	210	•			•
	220	•	•	•	•
	230	•	•	•	•
	240	•	•	•	•
	250	•	•	•	•

Vysvětlivky k označení kvality:

Označení	Kvalita vnějšího povrchu
1	velmi dobrá (lesklý, hladký)
2	nedostatečná (místy nedokonale spečený prášek)
3	velmi špatná (hrubý, drolivý)



obr.5.4.1 – porovnání kvality vnějšího povrchu kůží



obr.5.4.2 – detail dezénu vnitřního povrchu kůže

#### 5.4.1 Tabulky naměřených hodnot

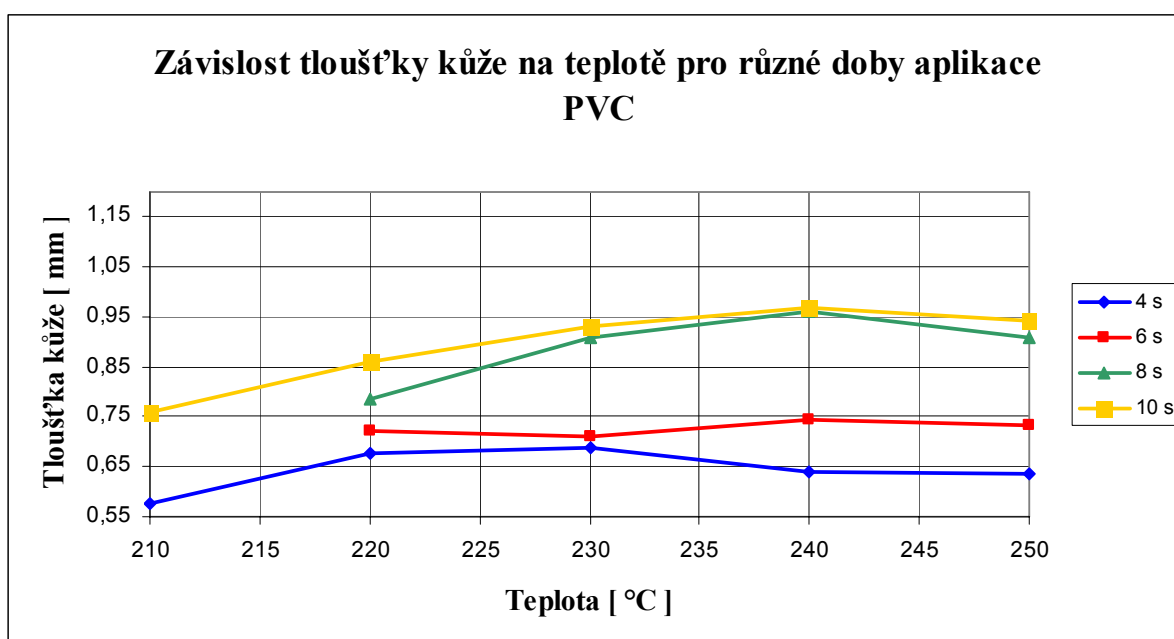
Následující tabulka podává souhrnný přehled průměrných hodnot naměřených během experimentů pro jednotlivé kombinace teploty formy a doby aplikace prášku (přehled všech naměřených hodnot viz. příloha 2)

T [ °C ]	t <sub>1</sub> [ s ]	δ [ mm ]	m <sub>k</sub> [ mg ]	I [ A ]	kvalita
210	4	0,58	13135,5	1,14	3
210	10	0,76	17313,0	1,15	3
220	4	0,68	14064,0	1,16	1
220	6	0,72	16059,0	1,16	2
220	8	0,79	17866,9	1,16	3
220	10	0,86	19721,7	1,17	3
230	4	0,69	16522,0	1,19	1
230	6	0,71	17381,5	1,19	1
230	8	0,91	20307,0	1,20	1
230	10	0,93	20943,4	1,19	3
240	4	0,64	14411,9	1,26	1
240	6	0,75	17154,1	1,25	1
240	8	0,96	21809,2	1,25	2
240	10	0,97	22263,8	1,26	1
250	4	0,63	14398,3	1,30	1
250	6	0,73	16983,0	1,29	1
250	8	0,91	20644,4	1,30	1
250	10	0,94	22091,3	1,30	1

Souhrnná tabulka tloušťek kůží:

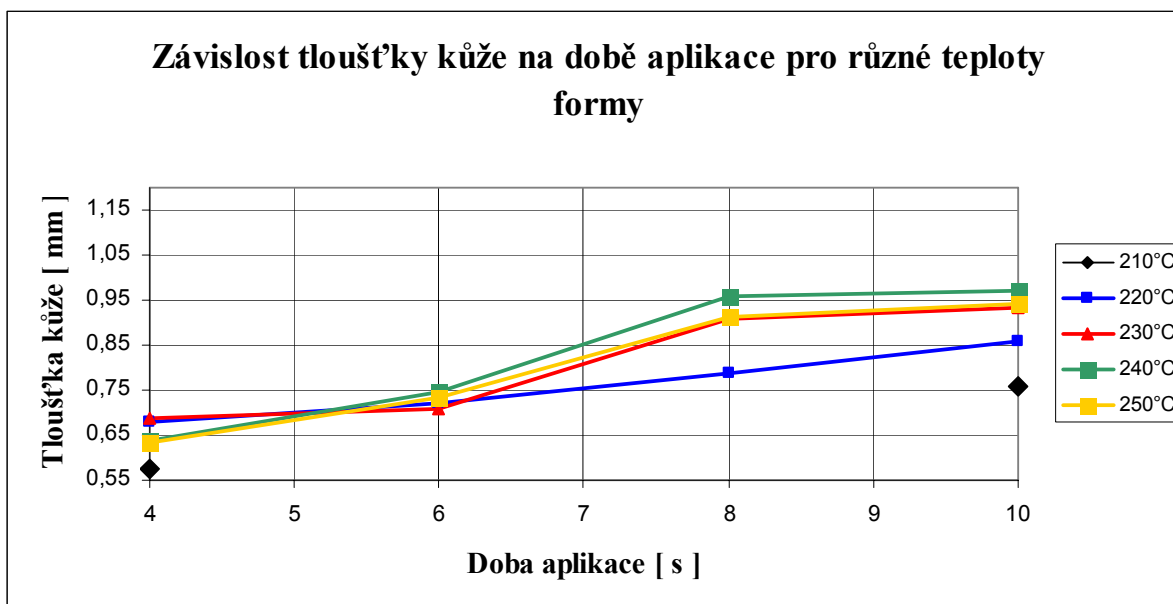
Tloušťka kůže [mm]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [ °C ]	210	0,58			0,76
	220	0,68	0,72	0,79	0,86
	230	0,69	0,71	0,91	0,93
	240	0,64	0,75	0,96	0,97
	250	0,63	0,73	0,91	0,94

Graf na *obr.5.4.1* zobrazuje závislost mezi tloušťkou kůže, teplotou formy a dobou aplikace prášku:



*obr.5.4.3*

Z grafu na *obr.5.4.3* je patrné, že výsledná tloušťka kůže je závislá především na době aplikace prášku a změna teploty formy má v experimentem ověřeném intervalu pouze minimální vliv. Ještě zřetelněji to ukazuje graf na *obr.5.4.4*, kde jsou křivky pro různé teploty formy téměř totožné, čili různé teplotě formy odpovídá přibližně stejná tloušťka kůže.



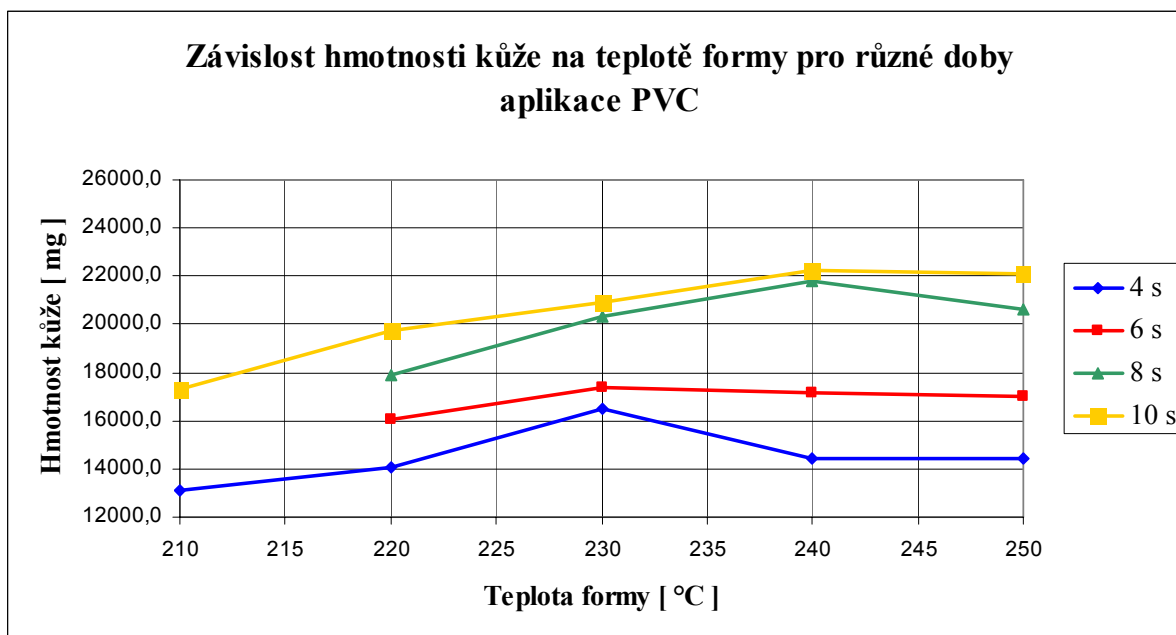
obr.5.4.4

Dalším závěrem, který z předešlých závislostí vyplývá je, že nárůst množství spečeného prášku je strmější s rostoucí dobou aplikace prášku, především mezi 6. až 10. vteřinou oproti prvním 6. vteřinám. To by mohlo být způsobeno průběhem teplotního gradientu při spékání, kdy v první fázi po aplikaci prášku dojde k odebrání tepla formě a spotřebování její tepelné kapacity. V prvních vteřinách než dojde k opětovnému doplnění kapacity formy je pak přestup tepla do PVC méně intenzivní než v době následující.

Souhrnná tabulka hmotností kůží:

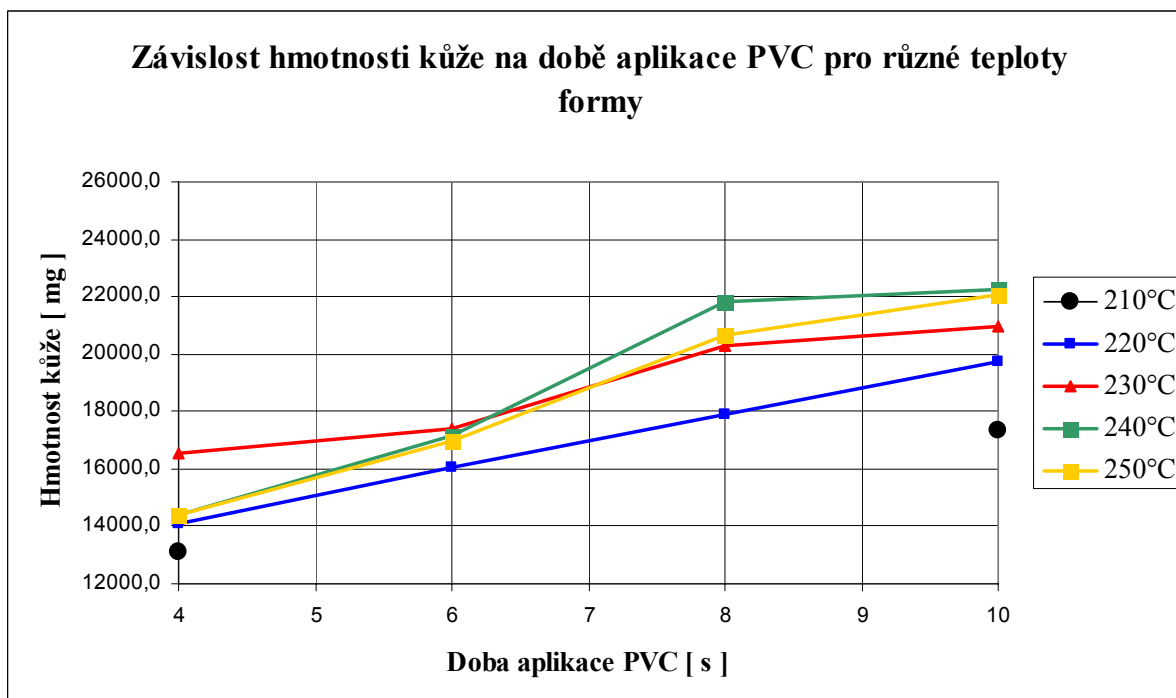
Hmotnost kůže [mg]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [ °C ]	210	13135,5			17313,0
	220	14064,0	16059,0	17866,9	19721,7
	230	16522,0	17381,5	20307,0	20943,4
	240	14411,9	17154,1	21809,2	22263,8
	250	14398,3	16983,0	20644,4	22091,3

Grafy na *obr.5.4.5* a *obr.5.4.6* zobrazují závislost mezi hmotností kůže, teplotou formy a dobou aplikace prášku:



*obr.5.4.5*

Grafy na *obr.5.4.5* a *obr.5.4.6* podporují tvrzení, že množství spečeného prášku je v daném intervalu teplot závislé především na době aplikace.



*obr.5.4.6*

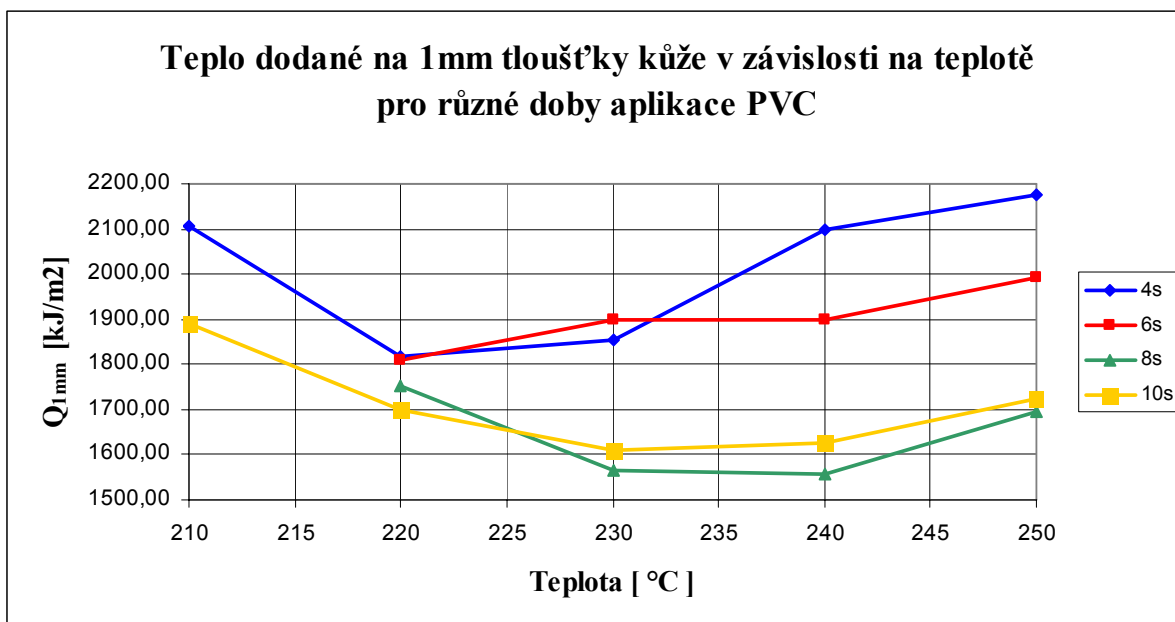
## 5.4.2 Tepelná bilance kůž

Následující tabulka předkládá hodnoty výkonu  $\underline{P}$  dodaného kůži, určeného z napájecího proudu  $\underline{I}$  desky mini-slush modulu a sníženého o 15% předpokládaných ztrát. Dalšími hodnotami jsou celkové teplo  $\underline{Q}$  dodané kůži, určené z výkonu a doby aplikace prášku  $\underline{t_1}$ , celkové množství tepla  $\underline{Q_{1m2}}$  potřebné k výrobě kůž o ploše  $1m^2$  a tloušťce  $\underline{\delta}$ , celkové množství tepla  $\underline{Q_{1mm}}$  a výkon  $\underline{P_{1mm}}$  pro výrobu kůž o tloušťce  $1mm$  a ploše  $1m^2$  a výkon  $\underline{P_{1kg}}$  potřebný k výrobě kůž o hmotnosti  $1kg$ , určený z hmotnosti kůž  $\underline{m_k}$ .

T [°C]	t <sub>1</sub> [s]	δ [mm]	m <sub>k</sub> [ mg ]	I [A]	P [W]	Q [J]	Q <sub>1m2</sub> [kJ/m2]	Q <sub>1mm</sub> [kJ/m2*mm]	P <sub>1mm</sub> [kW/m2*mm]	P <sub>1kg</sub> [kW/kg]
210	4	0,58	13135,5	1,14	639,54	21744,36	1210,98	2106,05	61,943	48,688
210	10	0,76	17313,0	1,15	645,15	25806,00	1437,18	1891,03	47,276	37,264
220	4	0,68	14064,0	1,16	650,76	22125,84	1232,23	1815,91	53,409	46,271
220	6	0,72	16059,0	1,16	650,76	23427,36	1304,71	1808,51	50,236	40,523
220	8	0,79	17866,9	1,16	650,76	24728,88	1377,19	1750,67	46,070	36,423
220	10	0,86	19721,7	1,17	656,37	26254,80	1462,17	1700,20	42,505	33,282
230	4	0,69	16522,0	1,20	673,20	22888,80	1274,72	1852,64	54,489	40,746
230	6	0,71	17381,5	1,20	673,20	24235,20	1349,70	1900,76	52,799	38,731
230	8	0,91	20307,0	1,20	673,20	25581,60	1424,68	1566,80	41,232	33,151
230	10	0,93	20943,4	1,20	673,20	26928,00	1499,67	1607,93	40,198	32,144
240	4	0,64	14411,9	1,26	706,86	24033,24	1338,45	2097,42	61,689	49,047
240	6	0,75	17154,1	1,26	706,86	25446,96	1417,18	1899,53	52,765	41,206
240	8	0,96	21809,2	1,26	706,86	26860,68	1495,92	1558,45	41,012	32,411
240	10	0,97	22263,8	1,26	706,86	28274,40	1574,65	1625,02	40,626	31,749
250	4	0,63	14398,3	1,30	729,30	24796,20	1380,94	2177,16	64,034	50,652
250	6	0,73	16983,0	1,30	729,30	26254,80	1462,17	1993,23	55,367	42,943
250	8	0,91	20644,4	1,30	729,30	27713,40	1543,41	1695,25	44,612	35,327
250	10	0,94	22091,3	1,30	729,30	29172,00	1624,64	1723,30	43,082	33,013

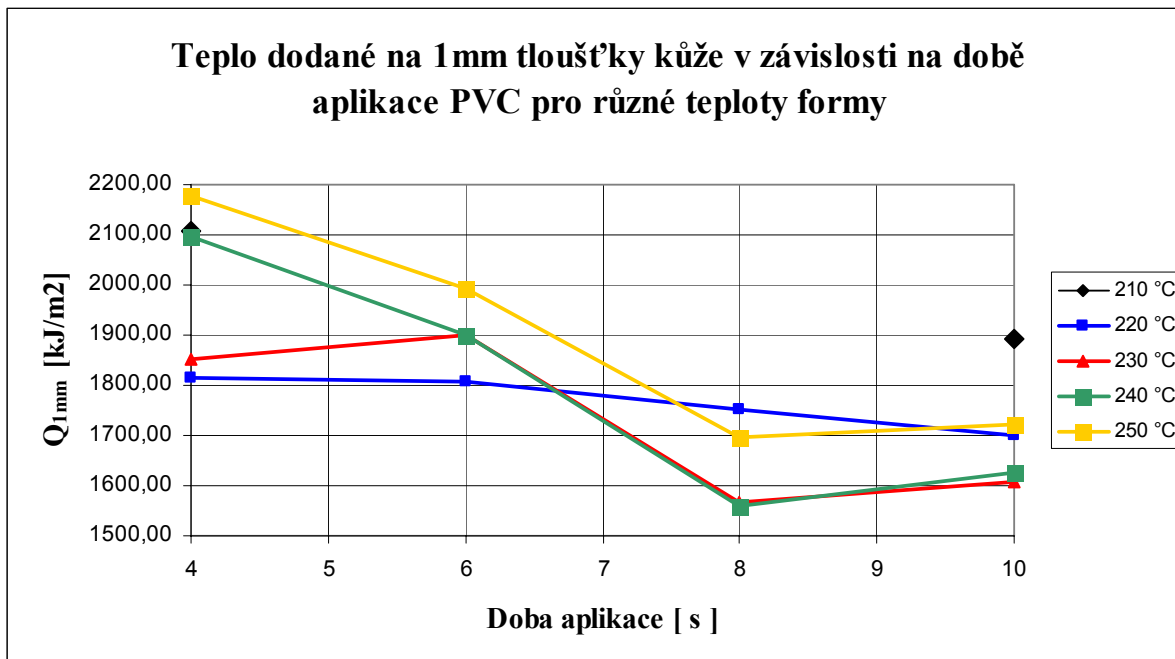
Souhrnná tabulka tepla dodaného na  $1mm$  kůž o ploše  $1m^2$ :

Q <sub>1mm</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [ °C ]	210	2106,05			1891,03
	220	1815,91	1808,51	1750,67	1700,20
	230	1852,64	1900,76	1566,80	1607,93
	240	2097,42	1899,53	1558,45	1625,02
	250	2177,16	1993,23	1695,25	1723,30



*obr.5.4.7*

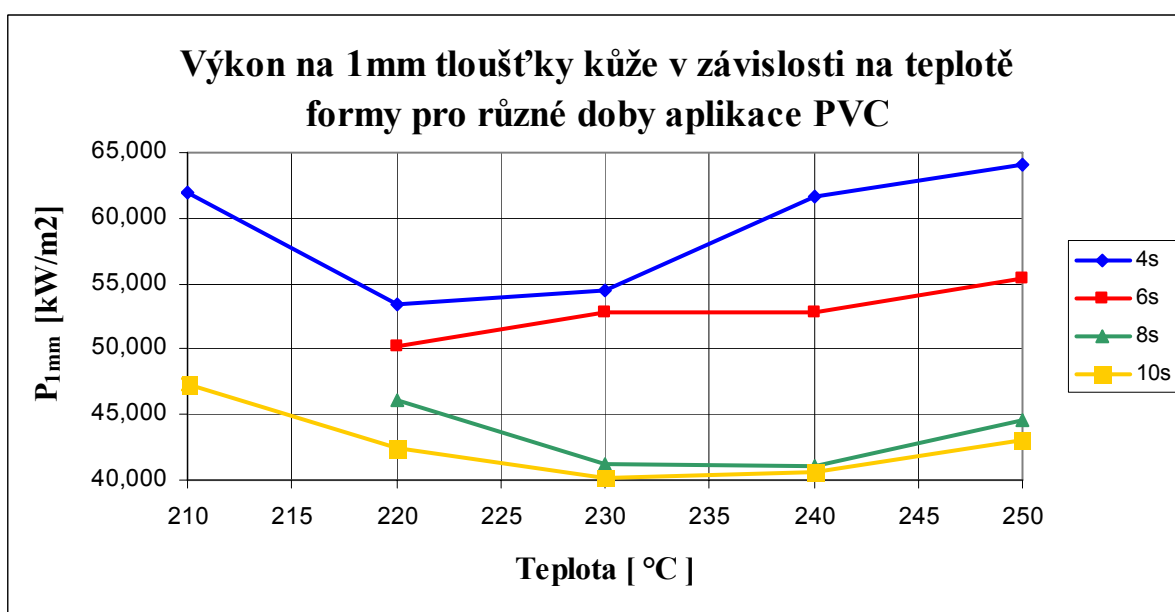
Z grafů na *obr.5.4.7a obr.5.4.8* je zřejmé, že nejvýhodnější z experimentem vyrobených vzorků z hlediska dodaného tepla je kombinace 230 °C teploty formy a 8s doby aplikace prášku, kdy bylo dosaženo největší tloušťky kůže s ohledem na co nejmenší množství přivedeného tepla při naplnění požadavku na kvalitu kůže. To vyplývá z předchozího poznatku, že tloušťka kůže je závislá především na době aplikace prášku. Teplota formy 230°C a doba aplikace prášku 8s představuje kombinaci nejdelší doby aplikace (zajišťuje velkou tloušťku kůže) při nejnižší teplotě (představuje nejnižší výkon dodávaný formě), kdy ještě bylo dosaženo dobré kvality povrchu.



obr.5.4.8

Souhrnná tabulka a průběhy výkonu potřebného k vyrobení kůže o tloušťce 1mm a ploše 1m<sup>2</sup> :

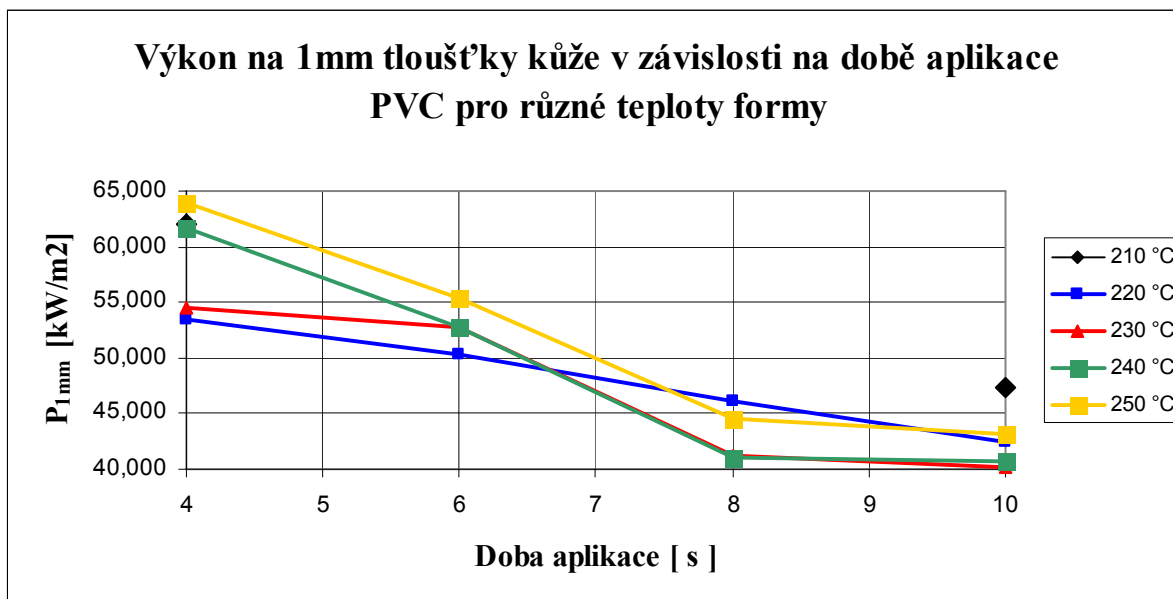
P <sub>1mm</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [ °C ]	210	61,943			47,276
	220	53,409	50,236	46,070	42,505
	230	54,489	52,799	41,232	40,198
	240	61,689	52,765	41,012	40,626
	250	64,034	55,367	44,612	43,082



obr.5.4.9



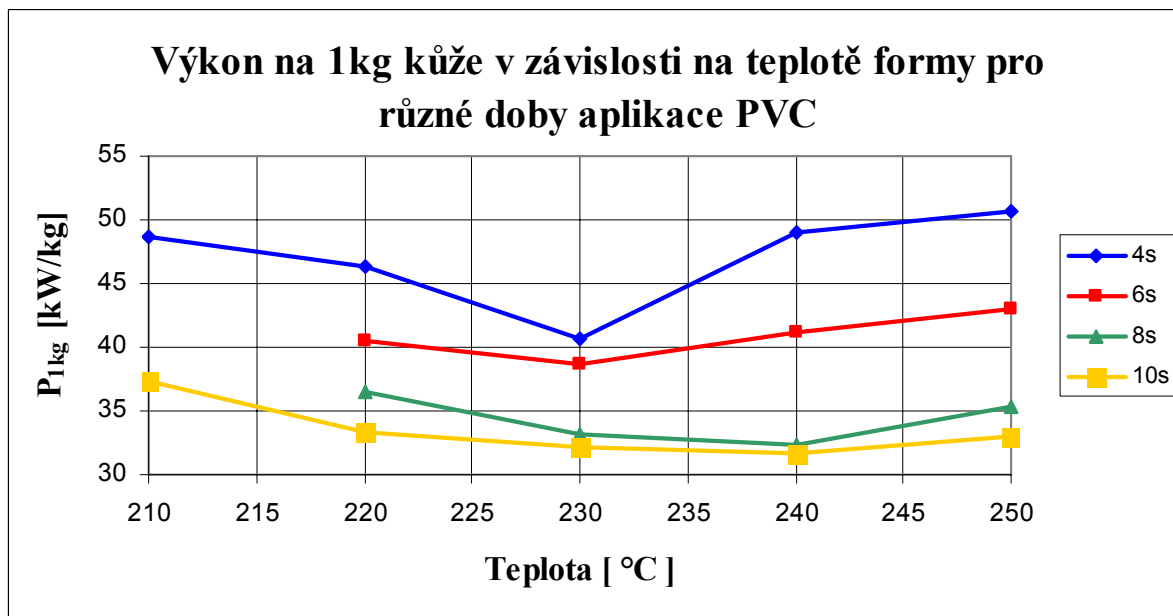
Z hlediska výkonu potřebného na 1mm tloušťky jsou nejvýhodnější vzorky s dobou aplikace 10s. To kromě z předchozího tvrzení vyplývá i z definice výkonu jako tepla přivedeného za čas, tedy čím delší dobu se přivádí stejné množství tepla, tím je výkon nižší.



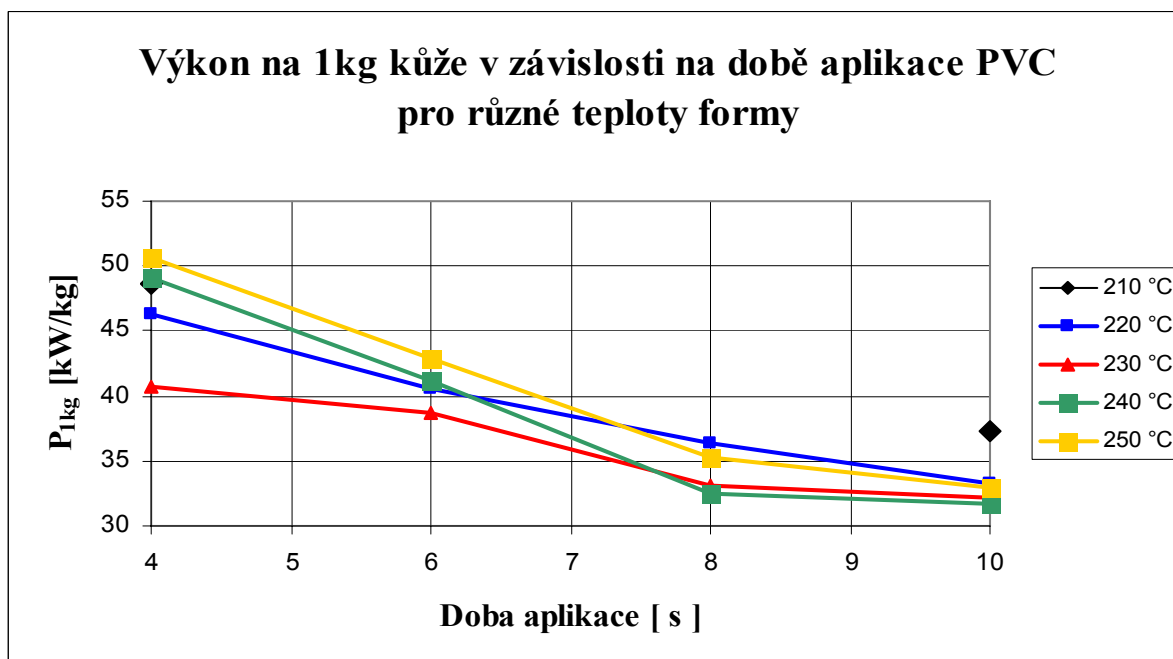
obr.5.4.10

Souhrnná tabulka a průběhy výkonu potřebného k vyrobení kůže o hmotnosti 1kg :

$P_{1kg}$ [kW/kg]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [ °C ]	210	48,688			37,264
	220	37,264	40,523	36,423	33,282
	230	40,746	38,731	33,151	32,144
	240	49,047	41,206	32,411	31,749
	250	50,652	42,943	35,327	33,013



obr.5.4.11

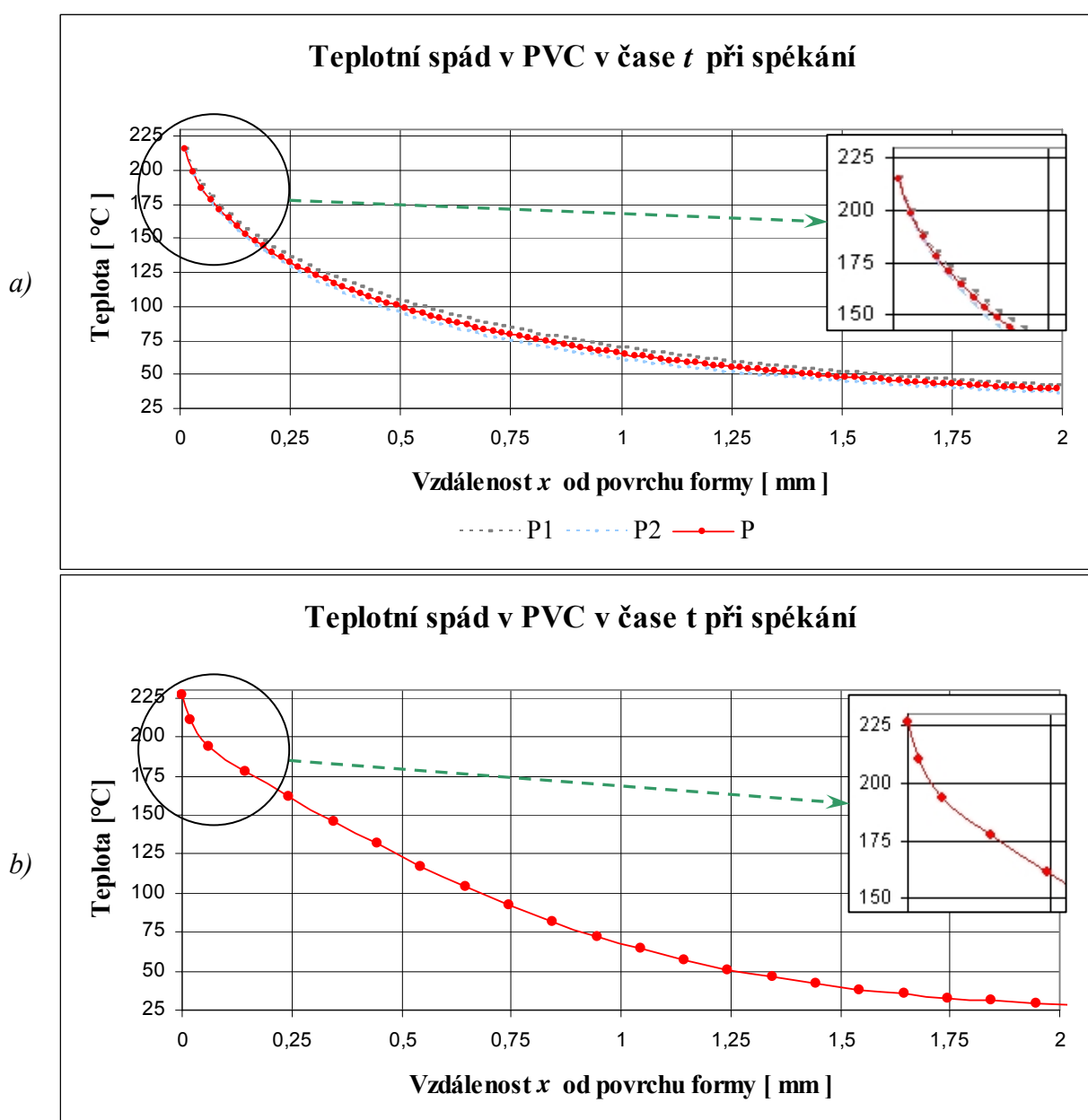


obr.5.4.12

## 6. Porovnání výsledků numerického a analytického řešení s experimenty

### 6.1 Porovnání teplotních spádů

Na *obr.6.1.1* je porovnání teplotních spádů analytického (*obr.6.1.1a*) a numerického (*obr.6.1.1b*) řešení. Hlavním důvodem odlišnosti průběhů je absence teplotní závislosti materiálových vlastností u analytického řešení. Na detailech je názorně vidět také vliv záporné objemové roztažnosti u numerického modelu, který analytický výpočet nezahrnuje.



*obr.6.1.1 – teplotní spád pro: a) analytické řešení; b) numerický model*

## 6.2 Kritická teplota

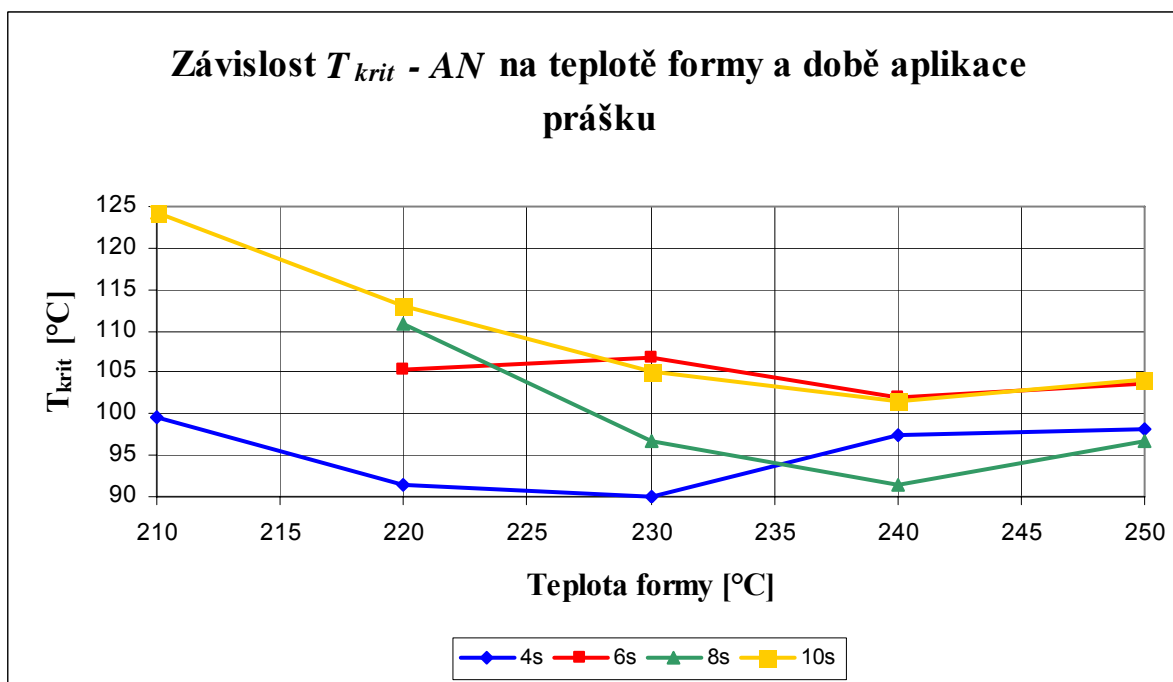
Kritická teplota  $T_{krit}$  tvoří pomyslné rozhraní v teplotním spádu při spékání prášku. Prášek s vyšší teplotou, než je teplota kritická ještě ulpí na vrstvě prášku spečeného k formě a stane se součástí výsledné kůže. Prášek s teplotou nižší než je teplota kritická již neulpí a po skončení doby aplikace je následkem otočení formy přesypán zpět do nádoby.

Hodnoty v následujících tabulkách byly vyhodnoceny z teplotních spádů analytického ( $T_{krit} - AN$ ) a numerického ( $T_{krit} - NU$ ) řešení na základě průměrných tloušťek experimentálně vyrobených kůží (do průměrné hodnoty nebyly započítány experimenty s velmi špatnou kvalitou vnějšího povrchu kůže, kde vychází vlivem nedokonale spečeného prášku tloušťka kůže větší, než kdyby byl prášek dokonale spečen).

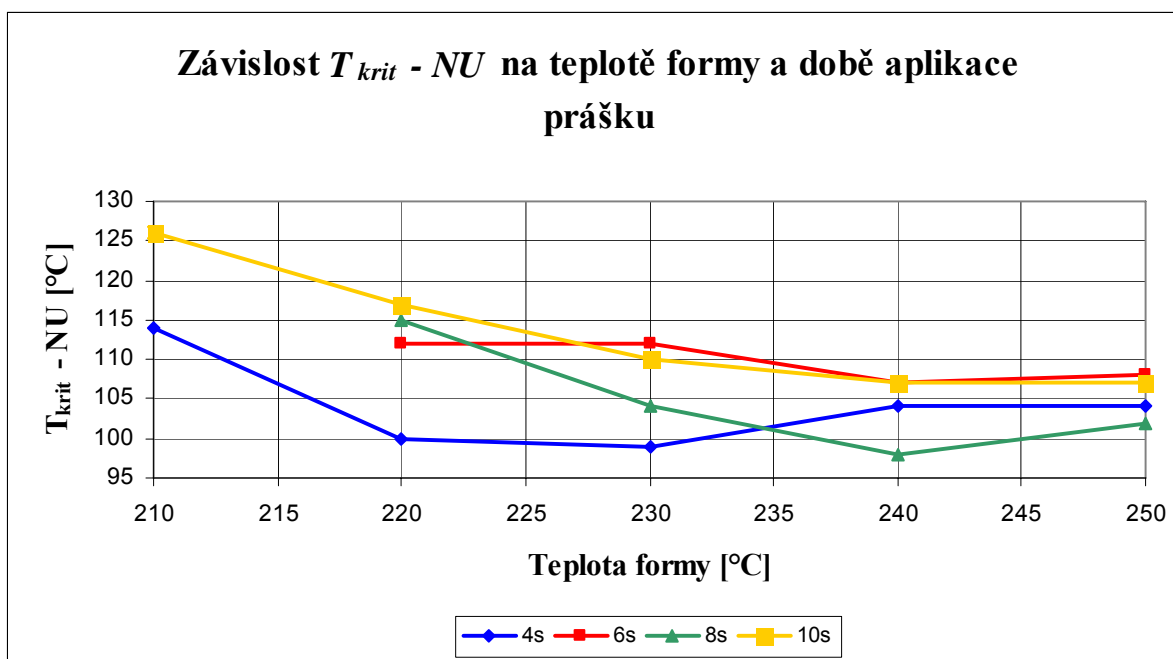
$T_{krit} - AN$ [°C]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [°C]	210	100			124
	220	91	105	111	113
	230	90	107	97	105
	240	98	102	91	101
	250	98	104	97	104
		Průměrná hodnota: 100,1			

$T_{krit} - NU$ [°C]		Doba aplikace PVC [ s ]			
		4	6	8	10
Teplota formy [°C]	210	114			126
	220	100	112	115	117
	230	99	112	104	110
	240	104	107	98	107
	250	104	108	102	107
		Průměrná hodnota: 105,9			

Na *obr.6.2.1* a *obr.6.2.2* jsou zobrazeny závislosti kritické teploty na teplotě formy a době aplikace prášku, které odpovídají předešlým tabulkám. Z grafů je patrné, že rozptyl hodnot pro numerické řešení oproti analytickému je menší a teplotní spád numerického modelu tedy více odpovídá skutečnosti.



*obr.6.2.1*



*obr.6.2.1*

K experimentálnímu určení kritické teploty  $T_{krit} - EX$  byl též použit mini-slush modul dle následujícího postupu:

- deska mini-slush modulu byla ohřáta na požadovanou teplotu

- na desku byl aplikován prášek po dobu cca 1s
- jako  $T_{krit}$  byla označena nejnižší teplota desky při které došlo k rovnoměrnému ulpění prášku na celé její ploše

Jako  $T_{krit} - EX$  byla označena teplota cca 135°C.

Hlavní příčinou odlišnosti experimentálně a výpočetně určené kritické teploty bude pravděpodobně chybně nastavená teplotní závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  prášku. Tato závislost není přesně známa a byla tedy odhadnuta na základě tepelné vodivosti kůže. Při vyšších teplotách (cca nad 200°C) se však prášek mění v podstatě na velmi viskózní tekutou fázi a teplotní závislost tepelné vodivosti může být v těchto oblastech výrazně komplikovanější a tepelná vodivost vyšší než byl předpoklad.

Dalším důvodem odlišnosti je zaměření simulace pouze na fázi aplikace prášku a není tedy zohledněn vývoj teplotního spádu a tloušťky ve fázi želírování.

## Závěr

I přes zatím velmi omezené množství dostupných informací o nově se rozmáhající technologii slush molding, se v této práci podařilo předložit ucelený souhrn základních poznatků o podstatě a technologických řešení tohoto procesu

K řešení problému tepelné bilance byl zvolen způsob komplexního přístupu, kdy byl proces vyhodnocen jako ucelený soubor operací se všemi fázemi reálného provozu. Tento přístup byl umožněn použitím mini-slush modulu, který asi jako první zařízení svého druhu umožňuje sledovat a vyhodnotit celý výrobní proces v laboratorních podmínkách. Na základě měření na mini-slush modulu bylo možno vyhodnotit množství tepla a výkonu potřebného pro výrobu PVC kůže v závislosti na teplotě a době aplikace prášku.

Díky experimentálnímu mini-slush modulu se též podařilo objasnit vliv teploty a doby aplikace prášku (v měřeném intervalu) na výslednou tloušťku kůže. Byl vyvrácen původně očekávaný předpoklad, že s rostoucí teplotou a prodlužováním doby aplikace prášku se bude zvyšovat i množství spečeného prášku. Experimenty prokázaly, že zásadní vliv na tloušťku kůže má v daném intervalu především doba aplikace prášku. Z toho vychází závěr, že energeticky nejvýhodnější je výroba při nejnižší možné teplotě formy, kdy je ještě splněn požadavek na kvalitu vnějšího povrchu.

Experimenty na mini-slush modulu též ukázaly, že je zařízení tohoto typu schopno věrně simulovat proces spékání prášku a může být s výhodou použito např. pro ověření změn parametrů výroby před jejich aplikováním do reálného výrobního procesu nebo k porovnání chování různých druhů materiálových směsí prášku.

Jako hlavní nevýhoda stávající konstrukce mini-slush modulu se však ukázala jeho snížená možnost reálně simulovat vliv doby želírování vzhledem k nízké účinnosti vzduchového chlazení. Slush-modul druhé generace bude již vybaven systémem kapalinového chlazení, které umožní rychlé zchlazení desky odpovídající reálnému provozu.

V další části se tato práce zabývala možností numerické simulace procesu slush molding. Byl zvolen způsob řešení metodou konečných prvků, který kromě teplotních změn během spékání prášku, postihl i změnu tloušťky vrstvy prášku vlivem jeho teplotní přeměny na výslednou kůži. To se ukázalo jako krok správným směrem k dosažení výsledků odpovídajících reálnému průběhu procesu.

Aby však byly výsledky simulace použitelné v praxi a co nejpřesněji odpovídaly skutečnosti, je třeba nejprve důkladně stanovit všechny potřebné materiálové a procesní parametry a model porovnat a odladit dle experimentálně ověřených výsledků.

Analytický výpočet se neukázal vzhledem k velké komplikovanosti procesu a množství teplotně závislých proměnných reálně použitelný. Jeho teoretický základ je však důležitý pro pochopení základních vztahů a závislostí.

Tato práce přinesla shrnutí základních poznatků o technologii slush molding a objasnila některé dosud neznámé závislosti. Zároveň však poukázala na směr, kterým by se mohl další výzkum ubírat a řadu nedostatků, které bude třeba do dalšího výzkumu zohlednit.

Především se jedná o nutnost úpravy stávající konstrukce mini-slush modulu s ohledem na výkonnější systém chlazení, který dovolí rozšířit experimenty i z hlediska vlivu doby želírování na parametry výsledné kůže a bude tak komplexně simulovat celý výrobní proces.

Mnoho možností do dalšího výzkumu skýtá numerický model, který má jistě velký potenciál pro optimalizaci stávající výroby a zavádění nových materiálových směsí do procesu. Po důkladném odladění stávajícího modelu jej lze rozšířit o simulaci fáze želírování případně i chlazení. Výhledově by bylo možno model použít například i pro simulaci vlivu nerovnoměrného ohřevu formy apod.



## **Použitá literatura a zdroje informací**

- [1] [www.patentstorm.us](http://www.patentstorm.us)
- [2] [www.delphi.com](http://www.delphi.com)
- [3] [www.freepatentsonline.com](http://www.freepatentsonline.com)
- [4] [www.vinyl.org.au](http://www.vinyl.org.au)
- [5] [www.solvayindupa.com](http://www.solvayindupa.com)
- [6] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [7] Prof. Ing. Jiří Šesták, DrSc.; Prof. Ing. František Rieger, DrSc.; Přenos hybnosti, tepla a hmoty; ČVUT Praha; 2004
- [8] MSC. Marc 2005 User's Guide

# Přílohy

T [°C]	t1 [s]	Doba žehlování [s]	Počet vrstev	δ [mm]	I [A]	P [W]	Q [J]	Q <sub>1m2</sub> [kJ/m2]	Q <sub>1mm</sub> [kJ/m2*mm]	P <sub>1mm</sub> [kW/m2*mm]
210	30	0	1	1,15	1,15	645,15	19354,50	1077,88	937,29	31,243
210	30+2	20	2	1,35	1,14	639,54	33256,08	1852,09	1371,92	26,383
210	20	0	1	1,75	1,15	645,15	12903,00	718,59	410,62	20,531
210	20+2	20	2	1,40	1,16	650,76	27331,92	1522,16	1087,26	25,887
210	2	40	2	0,35	1,16	650,76	54663,84	3044,32	8698,06	103,548
230	2	30	2	0,75	1,32	740,52	47393,28	2639,41	3519,22	54,988
210	5	30	2	0,95	1,14	639,54	44767,80	2493,19	2624,42	37,492
230	5	30	2	1,00	1,42	796,62	55763,40	3105,56	3105,56	44,365
250	5	30	2	1,05	1,38	774,18	54192,60	3018,08	2874,36	41,062
230	3	30	2	0,85	1,41	791,01	52206,66	2907,48	3420,56	51,827
210	3	30	2	0,80	1,24	695,64	45912,24	2556,93	3196,16	48,427
210	5	40	2	1,20	1,00	561,00	50490,00	2811,87	2343,23	26,036
210	2	30	2	0,55	1,19	667,59	42725,76	2379,47	4326,31	67,599
210	5	30	1	0,60	1,09	611,49	21402,15	1191,92	1986,54	56,758
190	3	30	2	1,00	1,01	566,61	37396,26	2082,66	2082,66	31,555
250	3	30	2	1,00	1,35	757,35	49985,10	2783,75	2783,75	42,178
170	3	40	2	neměřeno	0,95	532,95	45833,70	2552,56		
170	5	30	1	neměřeno	1,01	566,61	19831,35	1104,44		
250	5	40	1	0,75	1,21	678,81	30546,45	1701,18	2268,24	50,405
210	3	300	1	0,40	1,20	673,20	203979,60	11359,97	28399,92	93,729

příloha 1 – souhrnná tabulka zkušebních měření

T [ °C ]	t1 [ s ]	Č. vzorku	δ [ mm ]	mk [ mg ]	I [ A ]	kvalita
210	4	4	0,58	13135,5	1,15	3
210	10	35	0,76	17313,0	1,14	3
220	4	5	0,68	14064,0	1,17	1
220	6	6	0,72	16059,0	1,16	2
220	8	7	1,08	21322,0	1,16	3
220	8	37	0,77	17424,0	1,17	2
220	8	39	0,81	18309,8	1,16	2
220	10	30	0,86	19721,7	1,17	2
230	4	1	0,57	12691,5	1,20	1
230	4	13	0,67	14753,2	1,19	1
230	4	14	0,69	18779,4	1,20	1
230	4	15	0,71	16033,5	1,19	1
230	6	2	0,72	15942,5	1,20	1
230	6	16	0,69	15861,5	1,19	1
230	6	17	0,73	16517,5	1,16	1
230	8	3	0,99	20929,5	1,21	1
230	8	18	0,83	19684,5	1,19	1
230	10	10	1,18	24787,5	1,20	3
230	10	33	0,93	20944,5	1,22	2
230	10	38	0,93	20942,3	1,21	2
240	4	9	0,61	13948,0	1,26	1
240	4	28	0,66	14875,7	1,25	1
240	6	8	0,95	19598,5	1,25	1
240	6	19	0,74	17072,5	1,26	1
240	6	21	0,75	17235,7	1,26	1
240	8	20	0,82	18779,4	1,27	1
240	8	26	1,07	24214,3	1,25	2
240	8	29	1,00	22434,0	1,26	2
240	10	27	0,96	22194,9	1,26	1
240	10	34	0,98	22332,6	1,27	1
250	4	23	0,63	14398,3	1,31	1
250	6	22	0,73	16983,0	1,30	1
250	8	25	0,91	20485,8	1,29	1
250	8	31	0,91	20803,0	1,29	1
250	10	24	0,91	20982,0	1,30	1
250	10	32	0,98	23200,6	1,30	1

*příloha2 – kompletní tabulka hodnot experimentů na mini-slush modulu*